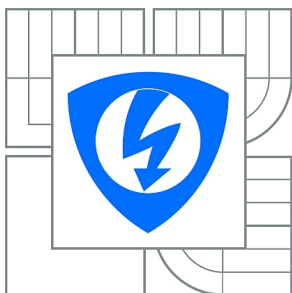




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## REGULAČNÍ OBVODY VÍŘIVÉ BRZDY

CONTROL CIRCUITS OF EDDY-CURRENT BRAKE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

OLDŘICH HOFMANN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HUTÁK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Oldřich Hofmann

**ID:** 154732

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

**NÁZEV TÉMATU:**

## Regulační obvody vířivé brzdy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Navrhněte výkonový dvou kvadrantový tranzistorový měnič pro řízení brzdy.
2. Navrhněte regulační obvody pro řízení brzdy - regulace na konstantní rychlost s podřazenou proudovou smyčkou.
3. Navržené obvody realizujte
4. Proveďte měření a vyhodnocení parametrů navrženého řízení.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] Skalický, J.: Teorie řízení, skripta FEKT, 2002
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

**Termín zadání:** 22.9.2014

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Huták, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Anotace**

Obsahem bakalářské práce je návrh regulačních obvodů vířivé brzdy, která bude součástí dynamometru a bude sloužit k měření spalovacích motorů pro veterány v motorové zkušebně společnosti *Samohyl Motor Holding a.s.* Práce je zaměřena na návrh tranzistorového měniče pro řízení vířivé brzdy a na návrh regulace otáček. V práci jsou dále popsány různé druhy brzd používaných v dynamometrech a celková koncepce elektrických systémů dynamometru. Nedílnou součástí práce je také zkouška proudového regulátoru na skutečné brzdě a simulace chování regulované soustavy v prostředí MATLAB – SIMULINK.

## **Klíčová slova**

dynamometr, regulátor, tranzistorový měnič, vířivá brzda

## **Abstract**

The thesis deals with the design of control circuits for the eddy-current brake, which will be used as main component of the dynamometer. The thesis focuses on the design of transistor inverter used for driving the eddy current brake and the design of speed regulation. The thesis also describes various types of brakes used in dynamometers and the overall concept of dynamometer electrical systems. An integral part of the thesis is also the test of the current controller and simulation of the control system at MATLAB – SIMULINK.

## **Keywords**

dynamometer, eddy-current brake, regulator, transistor inverter

## **Bibliografická citace**

HOFMANN, O. *Regulační obvody vířivé brzdy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Regulační obvody vířivé brzdy** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

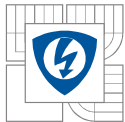
Podpis autora .....

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Petrovi Hutákovi, Ph.D.** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat **doc. Dr. Ing. Miroslavovi Patočkovi** za cenné rady při návrhu snižujícího tranzistorového měniče.

V Brně dne .....

Podpis autora .....



## OBSAH

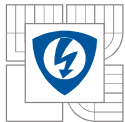
<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 DYNAMOMETR – MECHANICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 RŮZNÉ DRUHY PROVEDENÍ ABSORPČNÍ JEDNOTKY</b> .....	<b>12</b>
1.1.1 HYDRODYNAMICKÉ BRZDY .....	12
1.1.2 BRZDY S ELEKTRICKÝM STROJEM .....	13
1.1.3 VÍŘIVÉ BRZDY .....	14
1.1.4 HYSTEREZNÍ BRZDY .....	15
1.1.5 TANDEMŮVÉ BRZDY .....	16
<b>1.2 POUŽITÝ STROJ</b> .....	<b>16</b>
1.2.1 CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO STROJE .....	17
1.2.2 PARAMETRY BUDÍČÍHO VINUTÍ .....	18
<b>2 CELKOVÁ KONCEPCE ELEKTRICKÝCH SYSTÉMŮ</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 ZÁKLADOVÁ DESKA</b> .....	<b>22</b>
<b>3 TRANZISTOROVÝ MĚNIČ</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 MĚNIČ PRACUJÍCÍ POUZE V 1. KVADRANTU</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2 MĚNIČ PRACUJÍCÍ V 1. A 4. KVADRANTU</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3 BUDIČ VÝKONOVÝCH TRANZISTORŮ</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4 NÁVRH HLAVNÍCH VĚTVÍ MĚNIČE</b> .....	<b>26</b>
3.4.1 DIMENZOVÁNÍ SPÍNACÍCH TRANZISTORŮ A DIOD .....	26
3.4.2 NÁVRH CHLAZENÍ SPÍNACÍCH TRANZISTORŮ A DIOD .....	29
<b>3.5 NÁVRH VYBÍJECÍ VĚTVE MĚNIČE</b> .....	<b>30</b>
<b>3.6 FUNKČNÍ ZKOUŠKA MĚNIČE</b> .....	<b>31</b>
<b>4 REGULACE</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1 PROUDOVÁ SMYČKA</b> .....	<b>33</b>
4.1.1 REALIZACE PROUDOVÉHO REGULÁTORU POMOCÍ MIKROPOČÍTAČE ARDUINO DUE A OVĚŘENÍ JEHO FUNKCE .....	36
<b>4.2 OTÁČKOVÁ SMYČKA</b> .....	<b>39</b>
4.2.1 ČIDLO OTÁČEK .....	41
4.2.2 REALIZACE OTÁČKOVÉHO REGULÁTORU POMOCÍ MIKROPOČÍTAČE ARDUINO DUE A OVĚŘENÍ JEHO FUNKCE SIMULACÍ .....	42
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>47</b>
<b>PŘEHLED SYMBOLŮ A ZNAČEK</b> .....	<b>49</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>52</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

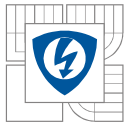
<i>Obr. 1.1: Dynamometr s hydraulickou brzdou – základní součásti (1 – rotor, 2 – stator) [2] (upraveno).....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 1.2: Fraudeho hydrodynamická brzda [3] (upraveno).....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.3: Kolíková hydrodynamická brzda [2] (upraveno).....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.4: Vířivá brzda – řez [4] (upraveno).....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1.5: Elektrická hysterezní brzda [6] (upraveno).....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1.6: Závislost maximálního trvalého brzdného momentu použité brzdy na otáčkách [9].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1.7: Závislost momentu dynamometru na budícím proudu [5] (upraveno).....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1.8: Schéma zapojení při měření elektromagnetické časové konstanty.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1.9: Průběh proudu brzdou při sepnutí spínače.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1.10: Průběh proudu brzdou při rozepnutí spínače.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2.1: Blokované schéma dynamometru.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.1: Schéma jednokvadrantového snižujícího měniče.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.2: Schéma dvoukvadrantového snižujícího měniče.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.3: Vnitřní blokované schéma obvodu IR2110 [10].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.4: Typické katalogové zapojení obvodu IR2110 [10].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.5: Zjednodušené schéma zapojení budiče a tranzistorového měniče.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.6: Náhradní schéma pro výpočet chladičů v hlavních větvích měniče.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.7: Napětí <math>U_{DS}</math> na tranzistoru Q2.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.8: Napětí <math>U_{DS}</math> na tranzistoru Q2 (náběžná hrana při vypnutí tranzistoru).....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.9: Schéma zapojení při testování funkce vybíjecího obvodu.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3.10: Průběh napětí meziobvodu při <math>I = 60\text{ mA}</math>.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4.1: Princip regulátoru otáček brzdy.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.2: Blokované schéma podřízené regulační smyčky proudu.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.3: Průběh střídý (nahore) a proudu (dole) při přechodu z <math>i_{bž,min} = 100\text{ mA}</math> na <math>i_{bž,max} = 800\text{ mA}</math>.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.4: Průběhy střídý (nahore) a proudu (dole) při přechodu z <math>i_{bž,max} = 800\text{ mA}</math> na <math>i_{bž,min} = 100\text{ mA}</math>.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.5: Průběhy střídý (nahore) a proudu (dole) při přechodu z <math>i_{bž,min} = 100\text{ mA}</math> na <math>i_{bž,max} = 2000\text{ mA}</math>.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4.6: Průběhy střídý (nahore) a proudu (dole) při přechodu z <math>i_{bž,min} = 100\text{ mA}</math> na <math>i_{bž,max} = 2000\text{ mA}</math> (detail).....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4.7: Zjednodušené blokované schéma otáčkové smyčky pro výpočet regulátoru.....</i>	<i>39</i>





---

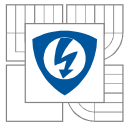
<i>Obr. 4.8: Schéma zapojení při měření čidla otáček.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4.9: Matematický model brzdy (závislost momentu <math>M_b</math> na úhlové rychlosti <math>\omega</math> a budícím proudem <math>I_b</math>) .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4.10: Vnější otáčková charakteristika zážehového motoru TATRA.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4.11: Průběhy sledovaných veličin při simulaci celé soustavy s vypočteným regulátorem otáček.....</i>	<i>44</i>



---

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1.1: Parametry dvojitého dynamometru na vířivé proudy 2 VD 110/6 [9] .....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 1.2: Parametry použitého dynamometru na vířivé proudy [9] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 4.1: Skutečné a změřené hodnoty při ověřování funkce čidla otáček .....</i>	<i>42</i>



## ÚVOD

Základními parametry každého točivého stroje jsou otáčky, moment, závislost momentu na otáčkách a závislost výkonu na otáčkách. Konkrétně u spalovacích motorů jsou pak důležité právě závislosti momentu a výkonu na otáčkách. Měření těchto parametrů je velmi důležitá složka vývoje, případně posuzování technického stavu motorů, a provádí se na dynamometru [1].

Dynamometr je zařízení sloužící k zatěžování jiného točivého stroje a k měření jeho otáček a momentu. Je na něm možné provádět různá měření jako zmíněné měření otáčkové charakteristiky nebo s pomocí dalších přístrojů měření spotřeby paliva, měření emisí atd. Dále je možné dynamometr využít k celé řadě zkoušek motorů, jako jsou: funkční zkouška, zkouška tepelné stability, zkouška životnosti, zkouška dlouhodobé stability parametrů aj. [1].

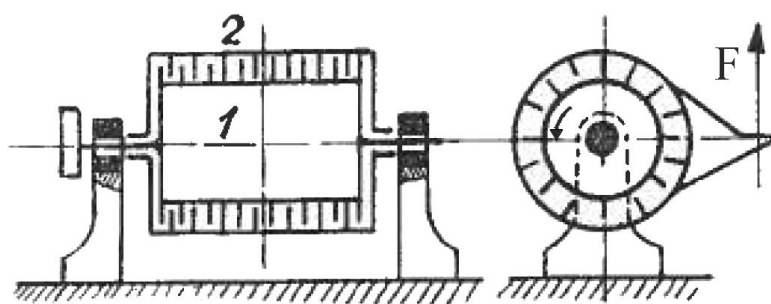
Některé výše popsané měření a zkoušky by se daly provést i bez dynamometru. Např. výkon motoru automobilu se dá vypočítat podle známého zrychlení vozidla, jeho hmotnosti, aerodynamického odporu vzduchu a dalších veličin. Nevýhodou takového měření je však přítomnost velkého množství prvků, které mohou měření ovlivnit a způsobit jeho chybu. Navíc je problém zajistit u tohoto způsobu měření jeho opakovatelnost. Při měření na dynamometru tyto problémy odpadají a díky tomu je možné zajistit daleko lepší podmínky pro měření a získání odpovídajících přesných výsledků.

Tato práce se zabývá návrhem elektrické části dynamometru, který bude umístěn v motorové zkušebně společnosti *Samohyl Motor Holding a.s.* a bude určen k měření motorů pro veterány.

Dílními složkami práce jsou popis dynamometru a různých druhů provedení absorpčních jednotek - brzd, popis celkové koncepce elektrických částí stroje, návrh a popis tranzistorového měniče pro řízení brzdy a návrh a popis regulačních obvodů. Funkční zkouška tranzistorového měniče a regulátorů je taktéž součástí této práce.

## 1 DYNAMOMETR – MECHANICKÁ ČÁST

Dynamometr je zařízení sloužící k zatěžování a měření točivých strojů. Používá se několik různých principů brždění, ale všechny dynamometry mají stejné základní součásti. Těmito součástmi jsou absorpční jednotka (brzda) a měřící zařízení. Princip dynamometru je vyobrazen na Obr. 1.1. Brzda se skládá z rotoru, který je pevně spojen s měřeným motorem, a ze statoru, který je uložen v ložiscích tak, aby se mohl volně otáčet ve stejné ose jako rotor. Mezi rotorem a státorem je prostředí, resp. pole, které klade odpor vzájemnému pohybu rotoru a statoru. Aby se stator nemohl volně protáčet, je upevněn přes rameno známé délky k suportu. Při brždění se přenáší moment vlivem prostředí nebo pole z rotoru na stator a dále přes rameno na suport. V místě spojení ramena a suportu se měří síla. V minulosti se k měření síly používaly upravené váhy, dnes se používají tenzometrické snímače [1].



Obr. 1.1: Dynamometr s hydraulickou brzdou – základní součásti (1 – rotor, 2 – stator) [2]  
(upraveno)

Se znalostí délky ramena na statoru a síly na něj působící lze vypočítat moment působící na stator dynamometru.

$$M_b = F \cdot l \quad (1.1)$$

Podle zákona rovnováhy sil musí moment stejné velikosti působit i na rotor a právě tímto momentem působí také měřený motor. Siloměr připevněný ke statoru ukazuje hodnotu, která je přímo úměrná velikosti momentu vyvíjeného měřeným motorem. Zobrazovací soustava velikosti síly proto bývá ocejchována přímo ve velikosti momentu.

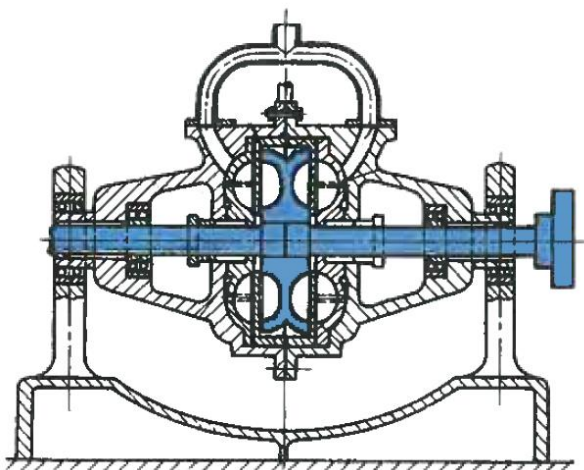
Další možností jak měřit velikost momentu je použít tenzometrickou hřídel mezi měřeným motorem a brzdou.

### 1.1 Různé druhy provedení absorpční jednotky

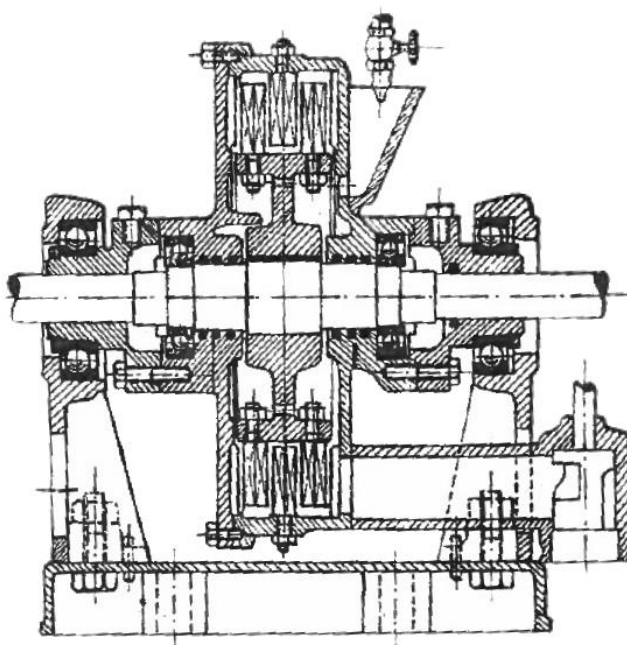
Absorpční jednotky (brzdy) se podle typu provedení dají rozdělit na hydrodynamické, elektrické, vířivé, hysterezní, práškové a tandemové (kombinované).

#### 1.1.1 Hydrodynamické brzdy

U hydrodynamických brzd se k vytvoření zatěžovacího momentu používá nejčastěji voda. Na vnitřním obvodu statoru jsou umístěny lopatky, případně kolíky. Rotor, který má na svém obvodu taktéž umístěny lopatky, se snaží uvést vodu v prostoru mezi státorem a rotorem do pohybu. Tomuto pohybu ale brání svými lopatkami stator. Dochází k víření vody a tím dochází ke vzniku brzdného momentu. Provedení tohoto typu brzdy je znázorněno na Obr. 1.1 [2], Obr. 1.2 [3] a Obr. 1.3 [2].



Obr. 1.2: Fraudeho hydrodynamická brzda [3] (upraveno)



Obr. 1.3: Koliková hydrodynamická brzda [2] (upraveno)

Pohybová energie vody a rotoru se mění na teplo, které je třeba odvádět mimo brzdu, a na kinetickou energii vody. Pracovní voda tedy musí být neustále intenzivně vyměňována a ochlazována. Regulace brzdného momentu se provádí změnou množství vody nebo nastavováním lopatek a kolíků [2].

Výhody tohoto systému jsou jeho jednoduchost, nízká cena, malý moment setrvačnosti a velký brzdný výkon při malých rozměrech brzdného tělesa. Nevýhodou je složitější a pomalá regulace [1].

### 1.1.2 Brzdy s elektrickým strojem

V tomto případě se k zatěžování měřených motorů používá asynchronní, synchronní nebo stejnosměrný motor. Moderní brzdy tohoto typu využívají kombinaci asynchronního nebo synchronního motoru a frekvenčního měniče. V minulosti se používal buď stejnosměrný motor

(dynamo), který pracoval do odporové zátěže nebo kombinace dvou stejnosměrných strojů a asynchronního motoru, která byla sestavena jako Ward Leonardovo soustrojí [1].

Především jako jediný ze zde popsaných má tento systém schopnost pracovat v motorickém režimu, pokud to umožňuje elektrický měnič, a měřit např. třecí ztráty nebo brzdné charakteristiky spalovacího motoru. Další výhodou je, že kinetická energie brzděného motoru (její podstatná část) se nemění v brzdě na teplo, ale na energii elektrickou, která může být rekuperována do elektrické sítě nebo mařena v brzdných odpornících mimo samotnou brzdu. Tento druh brzdy také může pracovat již při nulových otáčkách. Regulace je u střídavých strojů náročnější, u Ward Leonardova soustrojí jednoduchá. Další nespornou výhodou je dobrá dynamika (možnost rychlého a přesného nastavení brzdného účinku). Nevýhodou jsou větší rozměry a vysoká pořizovací cena [1].

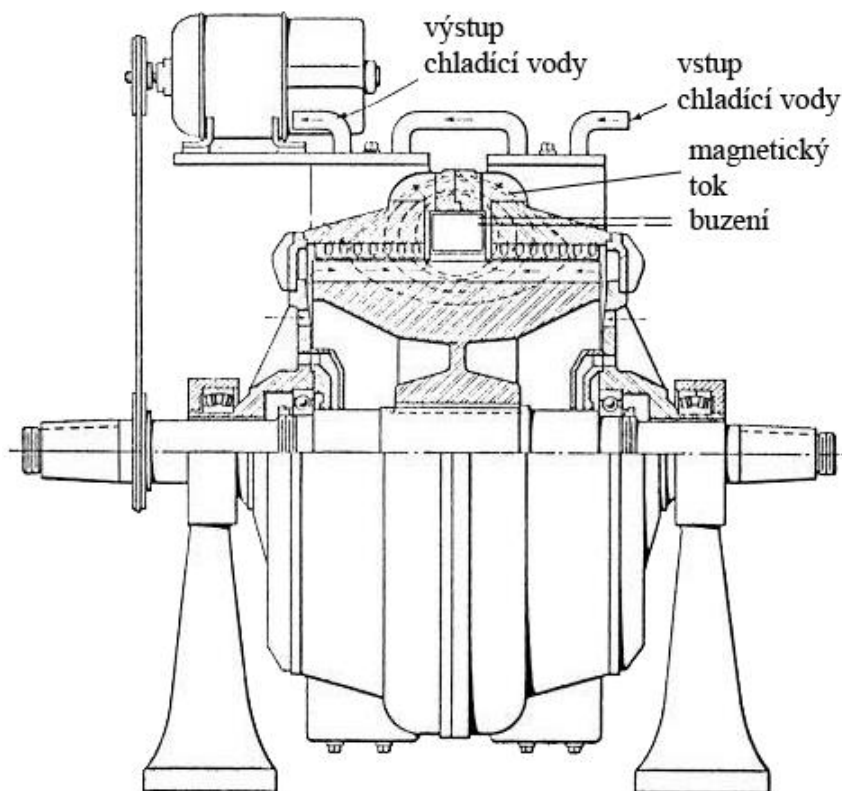
### 1.1.3 Vířivé brzdy

Ve vířivých brzdách vzniká brzdný moment vlivem vířivých proudů indukovaných v magnetickém obvodu. Ve statoru je uloženo vinutí, které je buzeno stejnosměrným proudem a vytváří magnetický tok. Rotor má tvar ozubeného kola, bývá nejčastěji vyroben z ocelového odlitku a jeho zuby tvoří pólové nástavce. Magnetický tok prochází tělesem statoru, přes vzduchové mezery přechází do pólových nástavců rotoru, dále prochází rotorem a přes vzduchové mezery na opačné straně se uzavírá. Magnetický tok a jedno z možných uspořádání elektrické vířivé brzdy je znázorněno na Obr. 1.4 [4].

Při otáčení rotoru dochází vlivem pólových nástavců rotoru k přesunu magnetického toku ve statoru. V rotoru má magnetický tok přibližně konstantní hodnotu, ale v místě přechodu přes vzduchovou mezeru do statoru jde tok cestou nejmenšího magnetického odporu a následuje pólové nástavce. Pokud sledujeme jeden bod v aktivní části statoru, mění se zde vlivem střídání zubu a mezery rotoru magnetický tok. Změna tohoto toku v čase indukuje v aktivní části statoru elektrické napětí a vznikají vířivé proudy. Jelikož stator není složen z tenkých plechů, jako je tomu u střídavých strojů, ale je tvořen homogenním kusem oceli, smyčky vířivých proudů mají velkou plochu a způsobují relativně velké tepelné ztráty. Dále vířivé proudy vyvolávají silové účinky, které podle Lenzova zákona působí svým směrem proti změně, která je vyvolala a vytvářejí tedy brzdný moment. Velikost tohoto momentu je závislá na vzájemné úhlové rychlosti rotoru a statoru a na velikosti magnetického toku statoru, resp. na velikosti budicího proudu [5].

Jak bylo napsáno výše, vířivé proudy způsobují ztráty a tímto zatěžují měřený motor. Veškerý mechanický výkon motoru se tedy v brzdě mění na teplo, a proto je nutné brzdu velmi intenzivně chladit. K tomu se používá přímé nebo nepřímé vodní chlazení, případně chlazení vzduchové. U přímého vodního chlazení je voda vedena přímo do rotorového prostoru a částečně k budicí cívce. U nepřímého vodního chlazení je voda vedena v kanálcích do prostoru budicí cívk a do aktivní vrstvy statoru. Chlazení vzduchem je konstrukčně nejjednodušší, ale vzniká zde omezení brzdného výkonu nedostatečnými chladicími schopnostmi vzduchu [5].

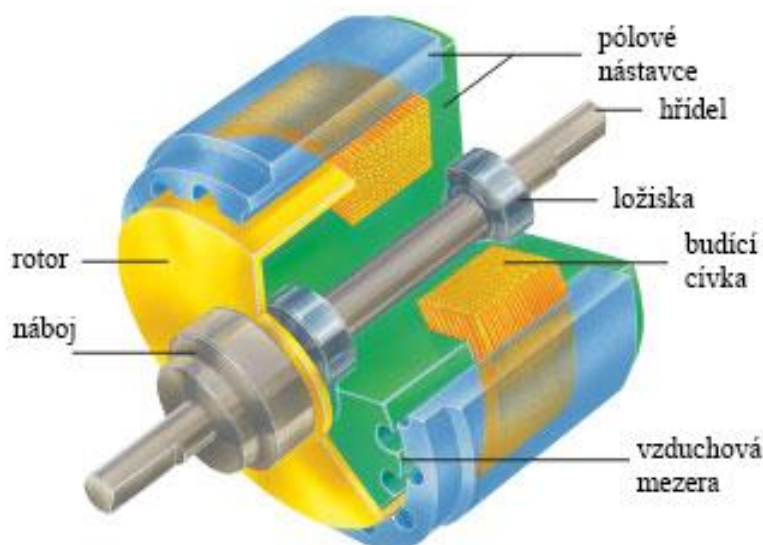
Výhodami vířivé brzdy jsou především konstrukční jednoduchost a také snadná a rychlá regulace brzdného momentu velikostí stejnosměrného proudu statorovým vinutím. Nevýhodou je pak u systémů s přímým vodním chlazením omezení maximálních pracovních otáček asi na  $6000 \text{ min}^{-1}$  až  $7000 \text{ min}^{-1}$ . Další velkou nevýhodou elektrických vířivých brzd je relativně velký moment setrvačnosti. Při poruše a zadření zkoušeného motoru tedy může dojít vlivem setrvačnosti brzdy k jeho destrukci [5].



Obr. 1.4: Vířivá brzda – řez [4] (upraveno)

### 1.1.4 Hysterezní brzdy

Na rozdíl od vířivých brzd nevyužívají hysterezní brzdy působení vířivých proudů a jejich zrát ve statoru, ale využívají hysterezní ztráty v materiálu rotoru. Uspořádání brzdy je znázorněno na Obr. 1.5 [6]. Rotor je tvořen ocelovým pláštěm a je umístěn mezi pólovými nástavci statoru. Při protékání proudu budící cívkou vzniká magnetický tok, který je veden pomocí pólových nástavců přes rotor. Při otáčení rotoru v tomto stacionárním magnetickém poli vznikají v rotoru hysterezní ztráty [6].



Obr. 1.5: Elektrická hysterezní brzda [6] (upraveno)

Výhodou elektrické hysterezní brzdy je nezávislost momentu na otáčkách [6]. Brzda je tedy schopna zatěžovat maximálním momentem už při nulových otáčkách [6]. Další výhodou jsou pak vysoké maximální provozní otáčky až  $30\,000\text{ min}^{-1}$  [7]. Nevýhodou je nižší brzdový moment, který je maximálně  $56,5\text{ Nm}$  [7]. Obě tyto hodnoty byly převzaty ze stránek výrobce *Magtrol, Inc.* a nevztahují se ke stejnému modelu zařízení.

### 1.1.5 Tandemové brzdy

Pro dosažení specifických vlastností lze jednotlivé druhy brzd kombinovat. Nejčastěji se využívá kombinace elektrické vířivé brzdy a elektromagnetické práškové brzdy. Prášková brzda dokáže poskytnout maximální moment od nulových otáček, ale kvůli problémům s chlazením se nehodí pro brzdění velkých výkonů. Prášková brzda není v této práci dále popisována. Při propojení výše uvedených typů brzd do tandemu pak je dynamometr schopen měřit s velkým momentem v celém rozsahu otáček. Při nízkých otáčkách se využije schopnost práškové brzdy poskytnout maximální moment, při vyšších otáčkách je využit zase velký výkonový potenciál vířivé brzdy [8].

## 1.2 Použitý stroj

Použitý stroj je část *dvojitého dynamometru s brzděním vířivými proudy 2 VD 110/6* od výrobce *Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých* (dnešní *VUES Brno s.r.o.*). Stroj byl vyroben v 60. letech 20. století, a jelikož se nedochovaly obě brzdy z původního dynamometru, je použit pouze jeden kus. Konstrukční provedení brzdy je podobné jako u vířivé brzdy na Obr. 1.4 [4]. Zařízení je uloženo v ložiskách a stator je pomocí tenzometru připojen k základové desce. Moment je tedy měřen tenzometrem. Původně bylo měření momentu prováděno pomocí upravené váhy, ale kvůli možnosti odečítat velikost momentu elektronicky a odesílat je přímo do PC bylo zvoleno právě měření tenzometrem. Otáčky stroje jsou měřeny pomocí inkrementálního čidla, které je realizováno talířem s 60 zářezy po obvodu a optozávory. Základní parametry původního soustrojí jsou uvedeny v Tab. 1.1 [9].

Tab. 1.1: Parametry dvojitého dynamometru na vířivé proudy 2 VD 110/6 [9]

$P_{2VD}$ [kW]	50	220	220
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	750	2500	6000
$M_{2VD}$ [kg.m]	65	85,6	35,7
$J_{2VD}$ [ $\text{kg.m}^2$ ]	3,76		
$U_{2VD}$ [V]	cca 60		
$I_{2VD}$ [A]	4		

V použitém stroji je pouze jedna brzda, takže je třeba přepočítat některé hodnoty. Vinutí byla v původním soustrojí zapojena paralelně, takže napětí zůstává stejné a proud se snižuje na polovinu původní hodnoty. Výkon, moment a moment setrvačnosti jedné brzdy je proti dvěma brzdám poloviční. Dále je nutné přepočítat moment do základních jednotek. Přepočet momentu je proveden podle následujícího vzorce:



$$M_{1VD} = \frac{M_{2VD}}{2} \cdot g \quad (1.2)$$

Pro otáčky  $n = 750 \text{ min}^{-1}$  tedy platí:

$$M_{1VD} = \frac{M_{2VD}}{2} \cdot g = \frac{65}{2} \cdot 9,81 = 318,8 \text{ N.m} \quad (1.3)$$

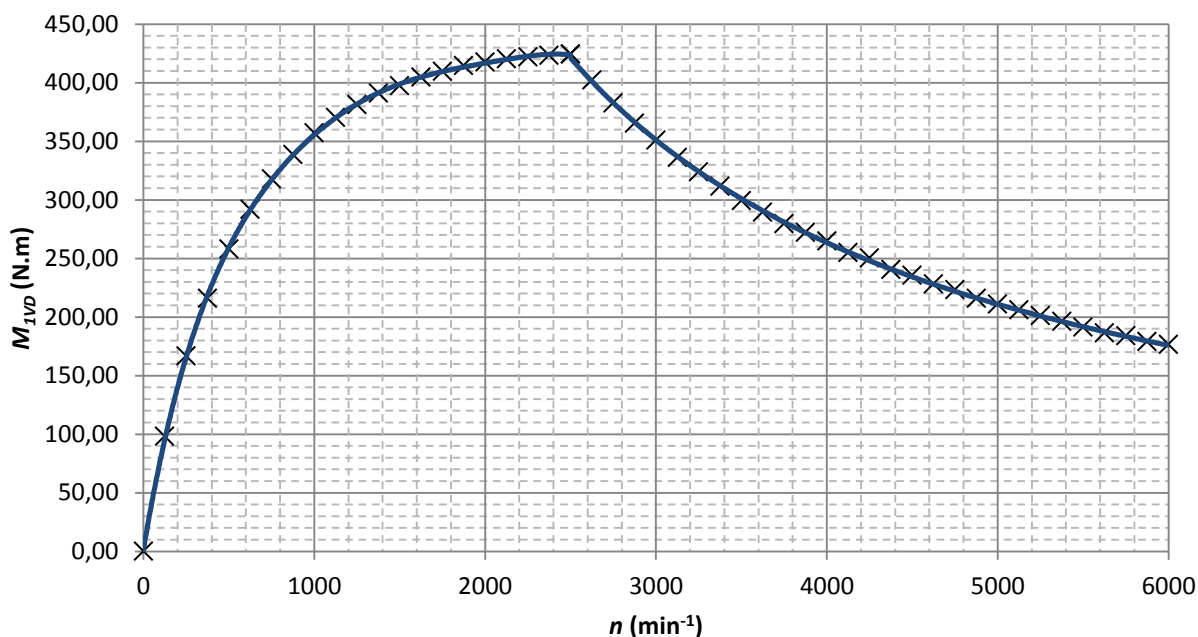
Parametry použitého stroje jsou uvedeny v Tab. 1.2.

Tab. 1.2: Parametry použitého dynamometru na vířivé proudy [9]

$P_{IVD}$ [kW]	25	110	110
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	750	2500	6000
$M_{IVD}$ [N.m]	318,8	419,9	175,1
$J_{IVD}$ [ $\text{kg.m}^2$ ]	1,88		
$U_{IVD}$ [V]	cca 60		
$I_{IVD}$ [A]	2		

### 1.2.1 Charakteristiky použitého stroje

Závislost brzdného momentu na otáčkách a budícím proudu je charakteristickou vlastností vířivé brzdy, kterou je potřeba znát při návrhu regulace. V technické dokumentaci k původnímu dynamometru je uvedena závislost maximálního brzdného momentu soustrojí v [kg.m] na otáčkách stroje. Charakteristika pro jednu brzdu s momentem přepočteným na [N.m] je vyobrazena na Obr. 1.6 [9]. Byla vytvořena odečtením množiny bodů z původní charakteristiky a přepočtením pomocí rovnice (1.2). Do  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  je maximální brzdný moment omezen maximálním proudem brzdy  $I_{IVD} = 2 \text{ A}$ , v oblasti nad  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  je pak omezen maximálním dovoleným brzdným výkonem  $P_{IVD} = 110 \text{ kW}$ .



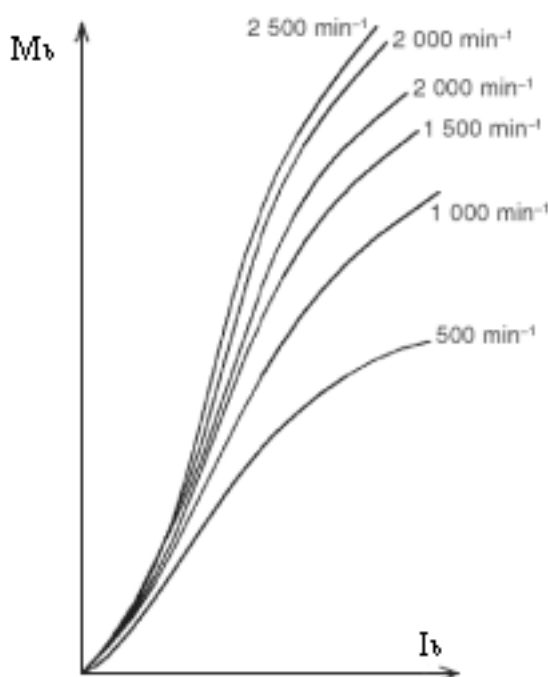
Obr. 1.6: Závislost maximálního trvalého brzdného momentu použité brzdy na otáčkách [9]

Hodnoty odečtené z původní charakteristiky a přepočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze A v Tab. A-1 [9] a Tab. A-2 [9]. V Tab. A-1 [9] jsou také uvedeny otáčky přepočteny na úhlovou rychlost  $\omega$  a brzdňý moment podle rovnice (1.4) přepočten do normovaného tvaru. Rovnice pro přepočet je:

$$M_{1VD,norm} = \frac{M_{1VD}}{424,28} \quad (1.4)$$

Hodnota 424,28 je maximální velikost momentu  $M_{1VD}$  odečtená z charakteristiky při otáčkách  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ . Normovaná velikost momentu  $M_{1VD,norm}$  je použita v matematickém modelu brzdy, byl použit pro simulaci a je popsán dále v práci.

Technická dokumentace ke stroji bohužel neobsahuje závislost brzdňého momentu  $M_b$  na budícím proudu  $I_b$ . Zdroj [5] se však zabývá regulací podobného (ne-li stejného) stroje, jako tato práce a tuto závislost uvádí. Charakteristika je uvedena na Obr. 1.7 [5].

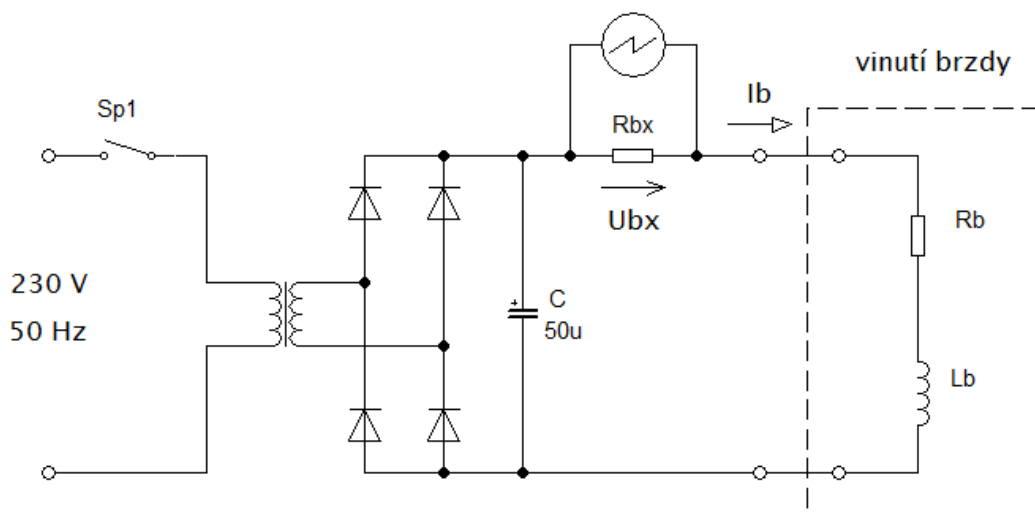


Obr. 1.7: Závislost momentu dynamometru na budícím proudu [5] (upraveno)

Tato závislost odpovídá tvaru závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole feromagnetického materiálu. Protože má charakteristika průběh podobný přímce, je dále v práci zavedeno zjednodušení a závislost momentu dynamometru na budícím proudu je považována za lineární.

### 1.2.2 Parametry budícího vinutí

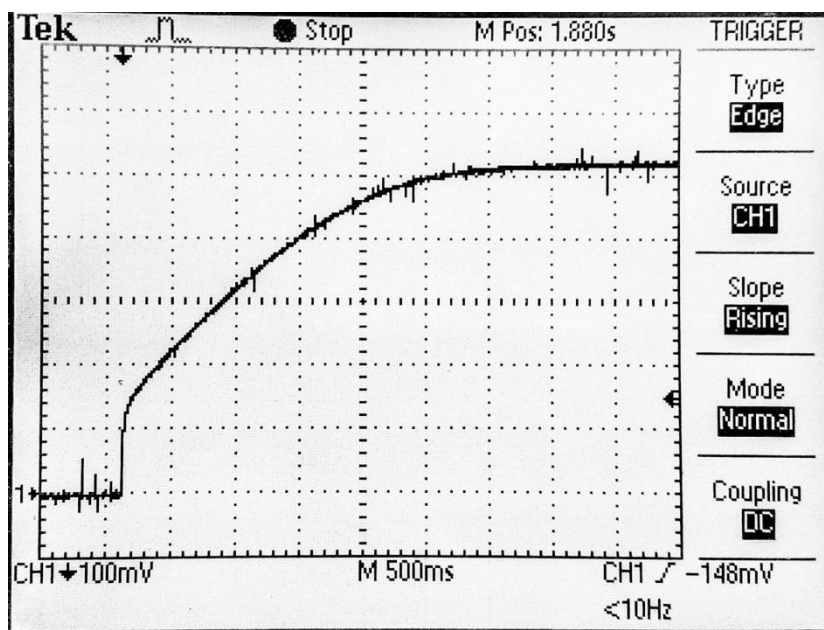
Odpor vinutí byl změřen pomocí Ohmovy metody a jeho hodnota je  $R_b = 22 \Omega$ . Elektromagnetická časová konstanta stroje byla změřena v zapojení podle Obr. 1.8.



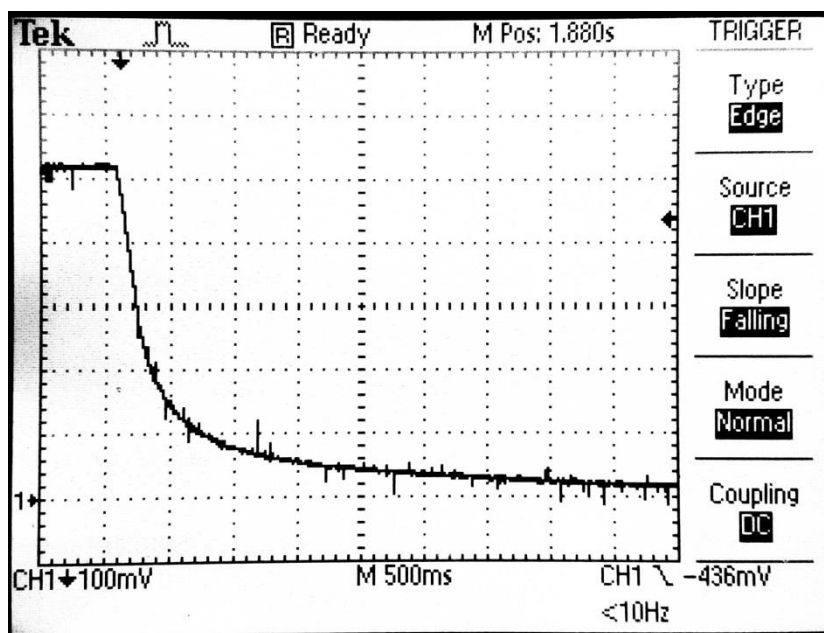
Obr. 1.8: Schéma zapojení při měření elektromagnetické časové konstanty

Při sepnutí nebo rozepnutí spínače Sp1 dochází v obvodu k přechodovému jevu. Proud brzdou  $I_b$  teče přes bočník  $R_{bx}$  a vytváří na něm úbytek napětí  $u_{bx}$ , jehož časový průběh je měřen osciloskopem. Elektromagnetická časová konstanta  $\tau_l$  je čas, za který dosáhne proud  $I_b$  resp. napětí  $u_{bx}$  63,212 % své ustálené hodnoty.

Změřené průběhy proudu při zapnutí a vypnutí spínače jsou na Obr. 1.9 a Obr. 1.10.



Obr. 1.9: Průběh proudu brzdou při sepnutí spínače



Obr. 1.10: Průběh proudu brzdou při rozepnutí spínače

Z měření vyplývá, že časová konstanta při zapnutí  $\tau_{i,on} = 1,3$  s a časová konstanta při vypnutí  $\tau_{i,off} = 360$  ms se neshodují. Časový průběh proudu při sepnutí navíc není exponenciální, jak by podle teoretického předpokladu měl vypadat.

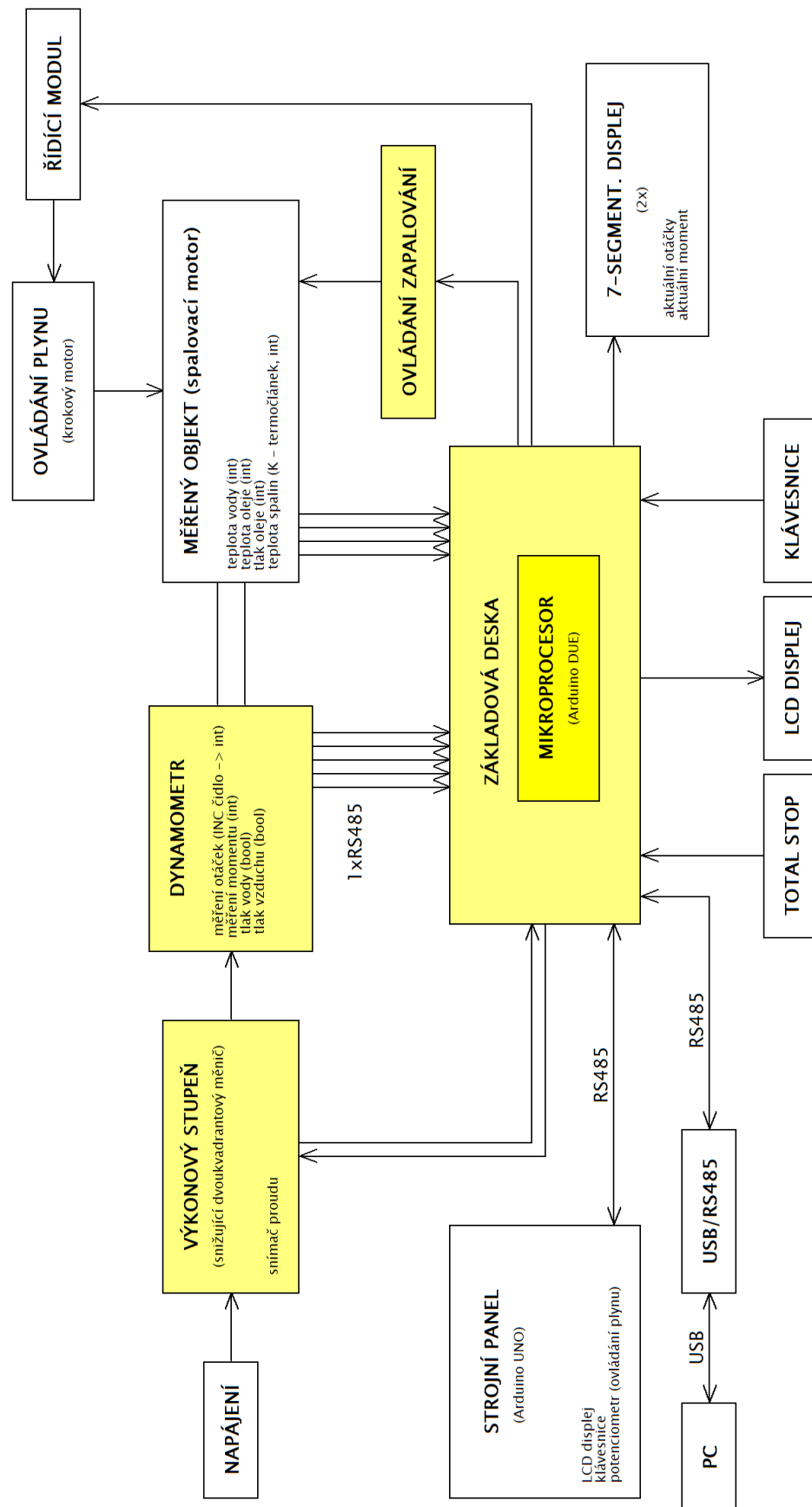
## 2 CELKOVÁ KONCEPCE ELEKTRICKÝCH SYSTÉMŮ

Blokové schéma celkové koncepce elektrických systémů je zobrazeno na Obr. 2.1. Jedná se o představu, jak by měl vypadat finální výrobek. Vzhledem ke komplexnosti celého výrobku se tato práce zabývá pouze bloky, které jsou označeny žlutou barvou.

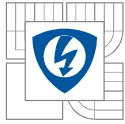
Elektrická vířivá brzda je napájena z dvoukvadrantového snižujícího tranzistorového měniče. Napájení tohoto měniče je provedeno ze stejnosměrného zdroje 70 V s galvanickým oddělením, který není součástí této práce. Otáčky systému jsou měřeny pomocí inkrementálního čidla a jsou vyhodnocovány pomocí mikropočítače, který reguluje pomocí tranzistorového měniče budící proud brzdy.

Komunikace mikropočítače a uživatele bude zajištěna klávesnicí a LCD displejem. Při měření uživatel zadá žádanou hodnotu otáček a pomocí akceleračního (plynového) pedálu nastaví plný výkon na zkoušeném spalovacím motoru. Regulátor v mikropočítači zajišťuje regulaci soustavy na konstantní nastavené otáčky a reguluje pomocí budícího proudu velikost brzdícího momentu. Po celou dobu budou na displeji zobrazovány okamžité hodnoty měřeného momentu a otáček soustavy. Po ustálení otáček soustavy budou uživatelem odečteny změřené hodnoty. Měřené hodnoty otáček a momentu budou kromě na LCD displeji také zobrazovány na LED displeji ze 7-segmentových bloků.

K měření momentu bude použit tenzometr *HBM U2A* s maximálním dovoleným zatížením 200 kg a citlivostí 2 mV/V. Signál z tohoto tenzometru bude zpracováván tenzometrickým převodníkem firmy *Papouch s.r.o.* typu *TE485*. Tento převodník bude komunikovat s mikropočítačem po sériové lince RS485.



Obr. 2.1: Blokové schéma dynamometru



Kvůli ochraně brzdy před zadřením je nutné snímat následující parametry:

- tlak chladicí vody na vstupu do brzdy
- tlak vzduchu pro vyvíječe olejové mlhy, které zajišťují mazání brzdy

Obě hodnoty jsou logického typu (1-bitové vstupy) a budou vyhodnocovány pomocí 2-stavových čidel.

Jedním z výstupů mikropočítače je relé s vyvedenými kontakty sloužící k připojení ovládání zapalování měřeného motoru. Při nesplnění provozních podmínek brzdy (nedostatečné tlaky vody a vzduchu), překročení maximálních dovolených otáček brzdy nebo při přerušení elektrického okruhu s tlačítkem / tlačítky TOTAL STOP bude prostřednictvím tohoto relé vypnuto zapalování měřeného motoru. Tlačítko TOTAL STOP bude umístěno na ovládacím pultu dynamometru.

Regulaci celého systému zajišťuje mikropočítač *Arduino DUE*, který je umístěn na základové desce.

## 2.1 Základová deska

Základová deska zajišťuje připojení veškerých periférií k mikropočítači. Napájení je řešeno externím zdrojem 12 V.

Seznam vstupů a výstupů:

- 6 x digitální vstup aktivní při připojení k zemi
- 1 x vstup (svorkovnice) pro připojení smyčky tlačítek TOTAL STOP
- 3 x digitální vstup aktivní při připojení k 5 V
- 3 x digitální vstup aktivní při připojení k 12 V
- 10 x analogový vstup
- 5 x digitální výstup (s otevřeným kolektorem)
- 1 x I<sup>2</sup>C sériová linka U = 5 V pro připojení alfanumerického LCD displeje
- 1 x konektor pro připojení displeje ze 7-segmentových bloků
- 2 x reléový výstup
- 3 x sériová linka RS485
- 1 x konektor pro připojení klávesnice
- svorkovnice pro připojení inkrementálního snímače otáček, snímače proudu budícím vinutím brzdy a svorkovnice pro připojení budičů tranzistorů výkonového stupně

Kromě zmíněných vstupů a výstupů je na desce umístěn také pomocný zdroj 20 V pro napájení řídicích obvodů výkonového stupně pro řízení brzdy.

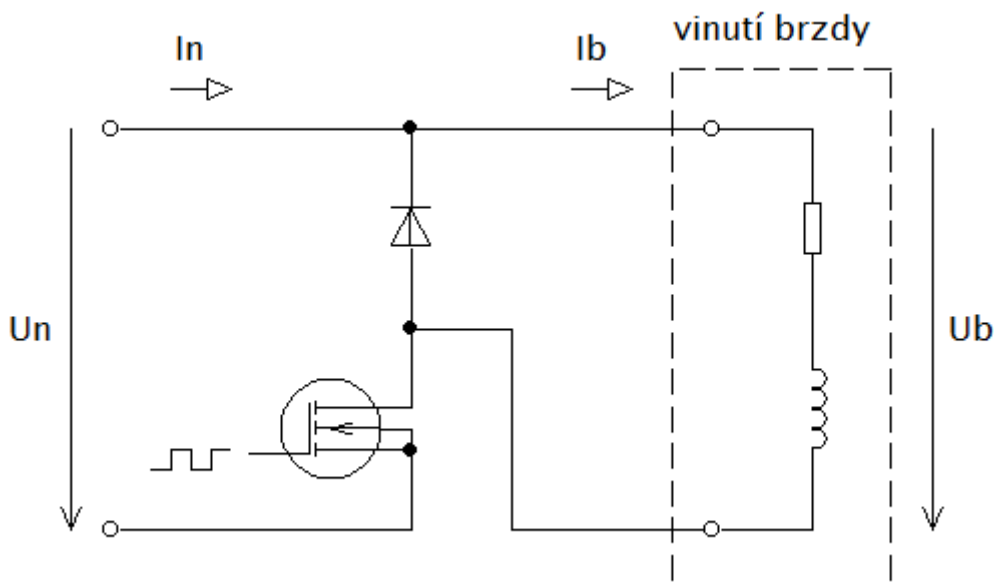
Schéma základové desky a návrh DPS je součástí přílohy této práce.

### 3 TRANZISTOROVÝ MĚNIČ

Tranzistorový měnič pro napájení vířivé brzdy je řešen jako snižující DC - DC měnič bez galvanického oddělení. Vinutí brzdy je napájeno stejnosměrným proudem pouze jedné polaritě a díky tomu mohou být použity buď měnič pracující pouze v 1. kvadrantu nebo měnič pracující v 1. a 4. kvadrantu.

#### 3.1 Měnič pracující pouze v 1. kvadrantu

Jednodušší možností je použít jednokvadrantový měnič pracující pouze v 1. kvadrantu. Schéma takového měniče je vyobrazeno na Obr. 3.1. Měnič v 1. kvadrantu umožňuje přenášet energii a kontrolovat její množství pouze ve směru zdroj – zátěž. Proud  $I_n$ ,  $I_b$  a napětí  $U_n$  mohou působit pouze v naznačeném směru. Napětí  $U_b$  působí při sepnutém tranzistoru v naznačeném směru. Při vypnutí tranzistoru se cívka chová jako zdroj a obrací polaritu napětí  $U_b$ . V tuto chvíli proud a energie neprotéká přes měnič zpět do zdroje, ale proud zůstává ve smyčce a energie magnetického pole cívky se v odporu vinutí a na úbytku diody mění na teplo.

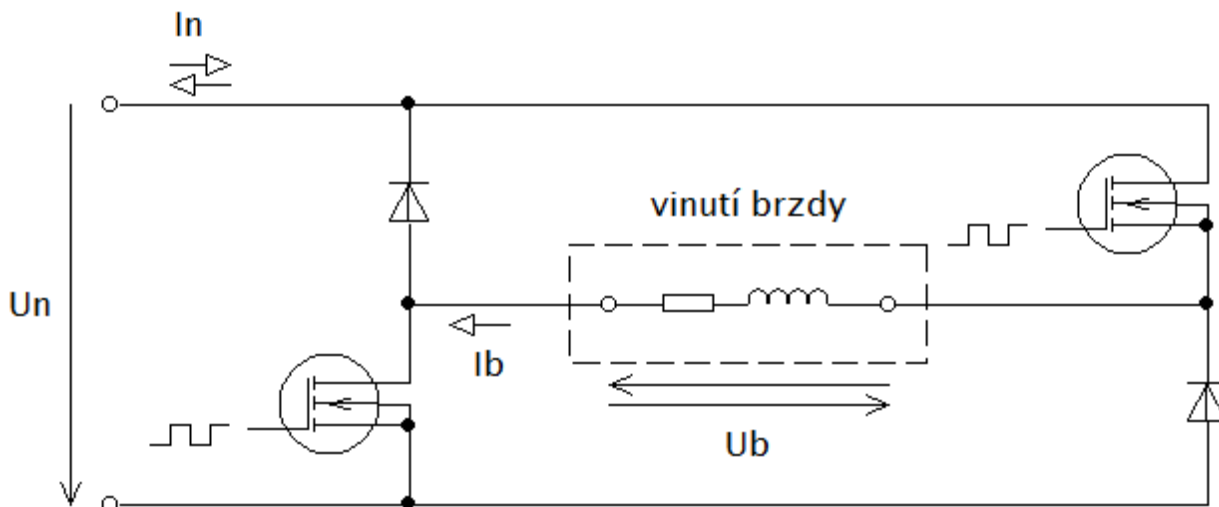


Obr. 3.1: Schéma jednokvadrantového snižujícího měniče

Díky tomu, že při připojení vinutí brzdy nemusí být žádný pól uzemněn, je možné s výhodou použít zapojení, kdy je spínací tranzistor na straně spodní napájecí sběrnice. Toto zapojení má výhodu v tom, že nepotřebuje obvodově problematický horní budič. Nevýhodou zapojení je ale pomalejší demagnetizace brzdy, která může snižovat dynamiku nastavování brzdného momentu.

#### 3.2 Měnič pracující v 1. a 4. kvadrantu

Složitější možností je použít dvoukvadrantový měnič pracující v 1. a 4. kvadrantu. Schéma takového měniče je vyobrazeno na Obr. 3.2. Na rozdíl od měniče pracujícího pouze v 1. kvadrantu umí tento měnič přenášet energii také ve směru zátěž – zdroj. Proud  $I_n$ ,  $I_b$  a napětí  $U_n$ ,  $U_b$  mohou působit ve všech naznačených směrech.



Obr. 3.2: Schéma dvoukvadrantového snižujícího měniče

V případě, kdy jsou sepnuty oba tranzistory se vinutí chová jako spotřebič. Pokud jsou oba tranzistory vypnuty a vinutí stále obsahuje energii, připojí se pomocí diod na napájecí sběrnice a je demagnetizováno plným napájecím napětím. Při tomto procesu je energie magnetického pole ve vinutí částečně vracena do zdroje a částečně vyzařována ve formě tepla odporem vinutí. Demagnetizace tímto způsobem je rychlejší. Další možností je vypnout pouze jeden tranzistor a druhý nechat otevřený. V takovém případě se pak měnič chová jako měnič pracující v 1. kvadrantu a demagnetizace je pomalejší.

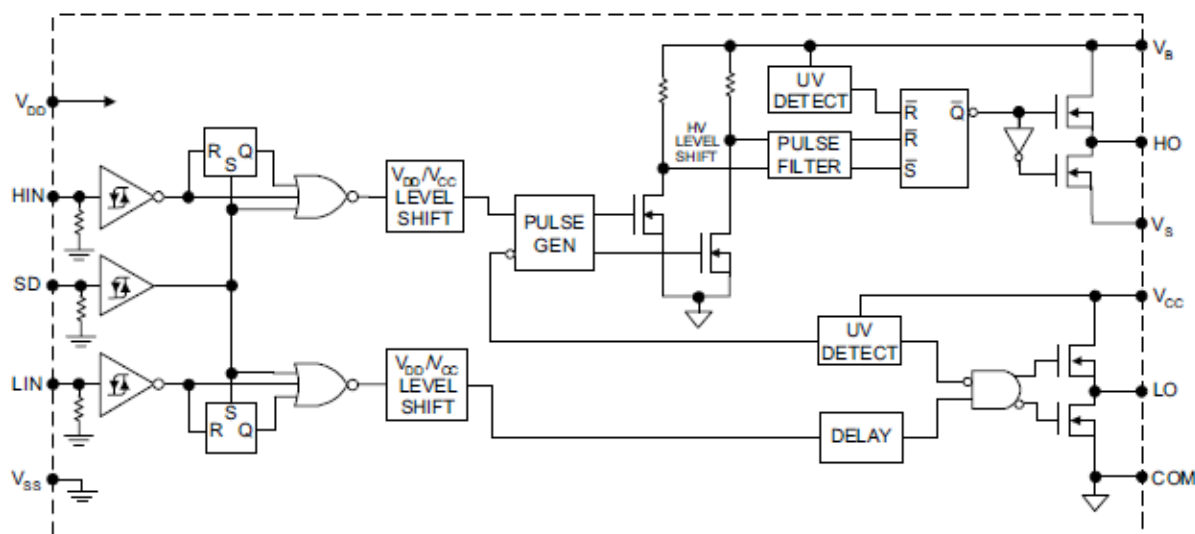
Výhodou dvoukvadrantového měniče je především možnost rychlejší demagnetizace vinutí brzdy. Nevýhodou tohoto zapojení je nutnost obvodově náročnější budič u horního spínače (tranzistoru). Další nevýhodou je potřeba měřit proud pro účely regulace přímo u budícího vinutí. Měření tohoto proudu je problémové, protože se v tomto místě značně mění napětí s velkou strmostí  $dU/dt$ . Z tohoto důvodu je nutné použít proudové čidlo s galvanickým oddělením vstupu a výstupu. další nevýhodou tohoto zapojení je také nutnost zpracovat energii, která se vrací do zdroje při „rychlé“ demagnetizaci.

Kvůli schopnosti tohoto typu měniče rychleji demagnetizovat brzdou byla zvolena topologie měniče pracujícího v 1. a 4. kvadrantu.

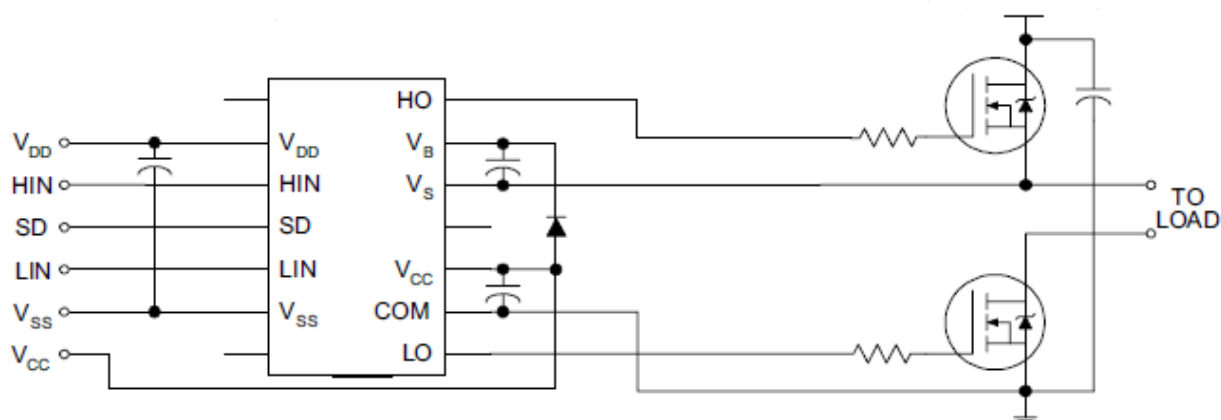
### 3.3 Budič výkonových tranzistorů

K buzení výkonových tranzistorů je nutné použít obvod, který umí budit horní spínač. V této práci je využit specializovaný obvod IR2110 od společnosti International Rectifier. Vnitřní blokové schéma tohoto obvodu je vyobrazeno na Obr. 3.3 [10]. Typické katalogové zapojení obvodu je uvedeno na Obr. 3.4 [10]. Obvod lze myšlenkově rozdělit na tři části: budič horního tranzistoru, budič dolního tranzistoru a vstupní obvody. Všechny části vyžadují vlastní napájení. Vstupní obvody zajišťují zpracování signálu z nadřazeného řídicího obvodu. Mezi vývody  $V_{DD}$  a  $V_{SS}$  je přivedeno napájení vstupních obvodů, které je v tomto případě 5 V. Vývod  $V_{SS}$  je uzemněn. Signál přiváděný na vývody HIN, LIN a SD může nabývat 2 úrovní – log. 1 a log. 0. Vstupy HIN a LIN slouží k ovládní buzení horního a dolního tranzistoru (při přivedení log. 1 na HIN je sepnut horní tranzistor). Vstup SD je nadřazen vstupům HIN a LIN a při nastavení do log. 1 nastaví buzení obou tranzistorů do stavu vypnuto [10].





Obr. 3.3: Vnitřní blokové schéma obvodu IR2110 [10]

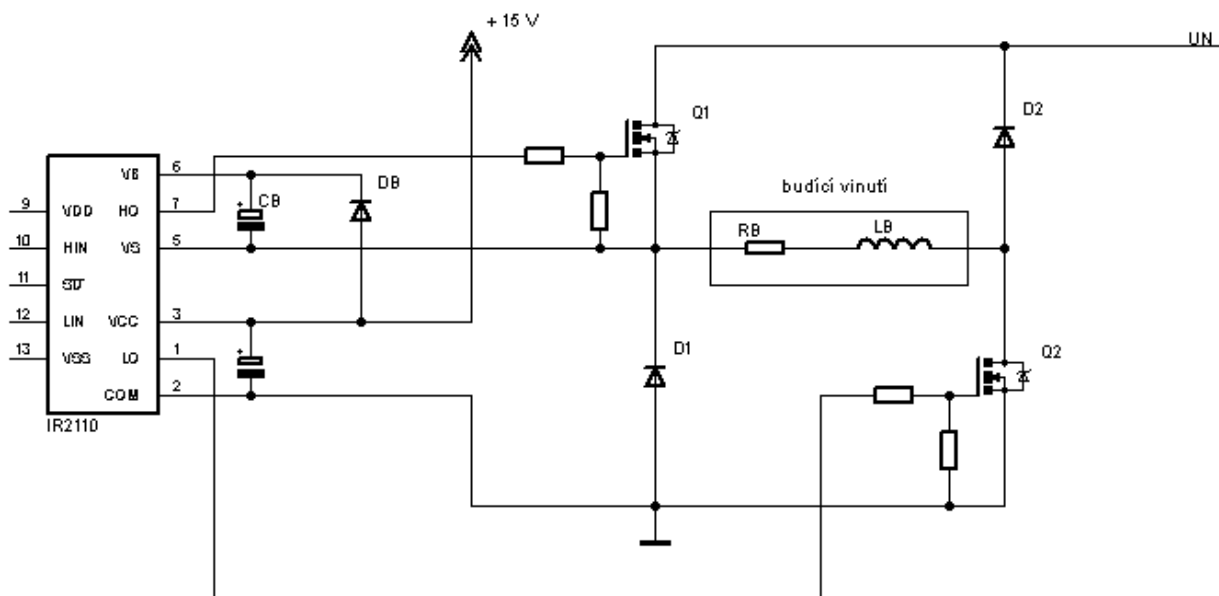


Obr. 3.4: Typické katalogové zapojení obvodu IR2110 [10]

Připojení budičů horního a dolního tranzistoru je znázorněno na Obr. 3.4 [10]. Vývody  $V_{CC}$  a  $COM$  slouží k napájení budiče dolního tranzistoru. Vývod  $COM$  je uzemněn a na vývod  $V_{CC}$  je přivedeno napájecí napětí + 15 V. Napájení budiče horního tranzistoru zajišťují vývody  $V_B$  a  $V_S$ , kde  $V_S$  je připojen k source vývodu horního spínacího tranzistoru a  $V_B$  pomocí bootstrapové diody k  $V_{CC}$  [10].

Princip napájení budiče horního tranzistoru je následující: Při sepnutí dolního tranzistoru se přes něj vývod  $V_S$  připojí k zemi a bootstrapový kondenzátor je nabíjen přes bootstrapovou diodu. Při vypnutí dolního tranzistoru je pak bootstrapový kondenzátor schopen po určitou dobu napájet budič horního tranzistoru. Tato metoda napájení budiče horního tranzistoru však předpokládá zapojení, kdy jsou oba buzené tranzistory zapojeny v jedné větvi [11].

V případě tranzistorového měniče pracujícím v 1. a 4. kvadrantu je však každý buzený tranzistor v jiné větvi. Zjednodušené zapojení je uvedeno na Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Zjednodušené schéma zapojení budiče a tranzistorového měniče

Jak je patrné ze schématu, v klidovém stavu není vodič VS připojen k žádné z napájecích sběrnic a bootstrapový kondenzátor CB se nemá jak nabít. Budič horního tranzistoru tedy nemá napájení a není schopen pracovat. Problém je řešen následujícím způsobem: V klidovém stavu je sepnut tranzistor Q2 a vývod VS je připojen přes vinutí brzdy a tranzistor Q2 k zemi. Uzavírá se tedy obvod nabíjení CB a nabíjecí proud teče přes DB, vinutí brzdy a tranzistor Q2. Po nabití CB je pak možno zahájit provoz měniče. Při provozu jsou střídavě zapínány a vypínány tranzistory Q1, Q2 a proud v levé větvi tedy protéká podle stavu Q1 buď tranzistorem Q1 nebo jeho nulovou diodou D1. Při protékání proudu přes diodu D1 je na ní úbytek asi 1 V a bootstrapový kondenzátor se tedy může nabíjet přes tuto diodu.

### 3.4 Návrh hlavních větví měniče

Tranzistorový měnič je dimenzován na napájecí napětí  $U_n = 200$  V a výstupní proud  $I_b = 4$  A. Tyto hodnoty byly zvoleny z důvodu možnosti rozšíření o napájecí zdroj až 200 V, který by umožnil zrychlit reakci proudové smyčky a zvýšil tím dynamiku nastavování brzdového momentu. Jestli tento lepší zdroj bude použit, bude rozhodnuto až po odzkoušení a posouzení funkce stávajícího měniče se zdrojem  $U_n = 70$  V. Hodnota  $I_b = 4$  A byla zvolena jako dvojnásobek jmenovitého budícího proudu použité brzdy  $I_{IVD}$  a to kvůli možnosti krátkodobého zvýšení brzdového momentu nad maximální dovolenou hodnotu trvalého momentu  $M_{IVD}$  při  $n < 2500$  min<sup>-1</sup>.

#### 3.4.1 Dimenzování spínacích tranzistorů a diod

Tranzistory Q1, Q2 jsou po vypnutí, kdy proud protéká nulovými diodami D1, D2 namáhány plným napájecím napětím  $U_n = 200$  V. Maximální napětí  $U_{DS,max}$  použitého tranzistoru by mělo být minimálně dvojnásobné tedy 400 V. Při sepnutí tranzistorů je plné napájecí napětí na jejich nulových diodách D1, D2. Maximální závěrné napětí diod  $U_R$  by mělo mít stejně jako u tranzistorů minimálně hodnotu dvojnásobku napájecího napětí  $U_n$  tedy 400 V. Tranzistorový měnič pracuje s nosnou frekvencí PWM  $f = 30$  kHz.

Pro výpočet proudu tranzistoru a diodami je nutné znát střidu proudu. Tu je nutno počítat pro plánované napájecí napětí  $U_n = 200$  V ale také pro současných  $U_n = 70$  V.

Do následujících výpočtů je zavedeno zjednodušení, že zvlnění budícího proudu  $\Delta I_b = 0$  A. Toto tvrzení je odůvodněno výpočtem zvlnění podle literatury [12], která říká, že při uvažování  $R_b = 0 \Omega$  platí:

$$\Delta I_{b,max} = \frac{U_n}{8fL_b} \quad (3.1)$$

Pro výpočet podle vzorce (3.1) je nutné znát indukčnost brzdy. Jelikož byly v kapitole 1.2.2 změřeny 2 různé časové konstanty, je zde uvažována horší varianta, při které by byla odpovídající indukčnost menší a zvlnění větší.

$$L_b = R_b \cdot \tau_{I,off} = 22 \cdot 360 \cdot 10^{-3} = 7,92 \text{ H} \quad (3.2)$$

Dosazením (3.2) do (3.1) dostaneme:

$$\Delta I_{b,max} = \frac{U_n}{8fL_b} = \frac{200}{8 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 7,92} = 105 \mu\text{A} \quad (3.3)$$

Při uvažování skutečného odporu vinutí brzdy  $R_b$  by bylo výsledné zvlnění ještě menší. Zvlnění proudu vinutím brzdy  $\Delta I_b$  tedy může být s minimální chybou zanedbáno.

#### a) výpočet pro $U_n = 200$ V:

Nejhorší situace pro tranzistor nastane při maximální velikosti výstupního proudu  $I_b = 4$  A. Napětí na budícím vinutí je v tomto případě:

$$U_b = I_b \cdot R_b = 4 \cdot 22 = 88 \text{ V} \quad (3.4)$$

Střída tranzistorů Q1, Q2 se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$s_Q = \frac{U_b}{U_n} = \frac{88}{200} = 0,44 \quad (3.5)$$

Pro střidu nulových diod D1, D2 platí:

$$s_D = 1 - s_Q = 1 - 0,44 = 0,56 \quad (3.6)$$

Pro střední hodnoty proudů diodami  $I_{F,s}$  a tranzistoru  $I_{D,s}$  platí [12]:

$$I_{D,s} = s_Q \cdot I_b = 0,44 \cdot 4 = 1,76 \text{ A} \quad (3.7)$$

$$I_{F,s} = s_D \cdot I_b = 0,56 \cdot 4 = 2,24 \text{ A} \quad (3.8)$$

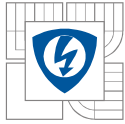
Pro efektivní hodnoty proudů diodami  $I_{F,ef}$  a tranzistoru  $I_{D,ef}$  platí [12]:

$$I_{D,ef} = \sqrt{s_Q} \cdot I_b = \sqrt{0,44} \cdot 4 = 2,65 \text{ A} \quad (3.9)$$

$$I_{F,ef} = \sqrt{s_D} \cdot I_b = \sqrt{0,56} \cdot 4 = 2,99 \text{ A} \quad (3.10)$$

Pro špičkové hodnoty proudů diodami  $I_{F,sp}$  a tranzistoru  $I_{D,sp}$  platí [12]:

$$I_{D,sp} \doteq I_b = 4 \text{ A} \quad (3.11)$$



$$I_{F,\dot{s}p} \doteq I_b = 4 \text{ A} \quad (3.12)$$

Na základě těchto hodnot byly vybrány spínací výkonové MOSFET tranzistory *IRFP460* a jejich nulové diody *MUR1560* s následujícími parametry:

IRFP460 [14]:

- $U_{DS,max} = 500 \text{ V}$
- $I_{D,max} = 20 \text{ A}$
- $I_{D,\dot{s}p,max} = 80 \text{ A}$
- $R_{DS,on} = 0,27 \ \Omega$
- $t_r = 15 \text{ ns}$
- $t_f = 25 \text{ ns}$
- $\vartheta_{Q,j,max} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
- $R_{Q,\vartheta,JC} = 0,6 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$

MUR1560 [15]:

- $U_R = 600 \text{ V}$
- $I_{F,max} = 15 \text{ A}$
- $I_{F,\dot{s}p,max} = 30 \text{ A}$
- $U_F = 0,75 \text{ V}$
- $R_{D,d} = 25 \text{ m}\Omega$
- $\vartheta_{D,j,max} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
- $R_{D,\vartheta,JC} = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$

Pro ztrátové výkony diod  $P_{D,ztr}$  a tranzistorů  $P_{Q,ztr}$  platí [13]:

$$P_{D,ztr} = U_F \cdot I_{F,s} + R_{D,d} \cdot I_{F,ef}^2 \quad (3.13)$$

$$P_{D,ztr} = 0,75 \cdot 2,24 + 25 \cdot 10^{-3} \cdot 2,99^2 = 1,9 \text{ W}$$

$$P_{Q,ztr} = P_{Q,ztr,on} + P_{Q,ztr,sw} \quad (3.14)$$

kde  $P_{Q,ztr,on}$  jsou ztráty vedením proudu a  $P_{Q,ztr,sw}$  jsou přepínací ztráty [13]:

$$P_{Q,ztr,on} = R_{DS,on} \cdot I_{D,ef}^2 \quad (3.15)$$

$$P_{Q,ztr,sw} = f \cdot \frac{1}{4} \cdot U_n \cdot I_b (t_r + t_f) \quad (3.16)$$

Dosazením (3.15) a (3.16) do (3.14) získáme:

$$P_{Q,ztr} = R_{DS,on} \cdot I_{D,ef}^2 + f \cdot \frac{1}{4} \cdot U_n \cdot I_b \cdot (t_r + t_f) \quad (3.17)$$

$$P_{Q,ztr} = 0,27 \cdot 2,65^2 + 30 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{4} \cdot 200 \cdot 4 \cdot (15 + 25) \cdot 10^{-9}$$

$$P_{Q,ztr} = 2,14 \text{ W}$$

**b) výpočet pro  $U_n = 70$  V:**

Při napájecím napětí  $U_n = 70$  V není možné dosáhnout budícího proudu  $I_b = 4$  A. Je zde tedy uvažována situace, kdy je střída  $s \rightarrow 1$ . V takovém případě dosahuje proud  $I_b$  své maximální hodnoty. Na ztrátách v tranzistoru se podílí ztráty vedením proudu  $P_{Q,ztr,on}$  i přepínací ztráty  $P_{Q,ztr,sw}$  a nabývají svých maximálních hodnot. Ztráty na nulových diodách  $P_{D,ztr}$  není potřeba počítat, protože budou vždy nižší, než v případě, že  $U_n = 200$  V. (Měničem tečou menší proudy a pracovní oblast střídá diody  $s_D$  je posunuta blíže k nule.)

Maximální dosažitelná hodnota proudu  $I_b$  při  $s \rightarrow 1$ :

$$I_b = \frac{U_n \cdot s_Q}{R_b} = \frac{70 \cdot 1}{22} = 3,18 \text{ A} \quad (3.18)$$

Pro střední, efektivní a špičkové hodnoty proudu tranzistoru  $I_{D,s}$  při  $s \rightarrow 1$  platí:

$$I_{D,s} = I_{D,ef} = I_{D,\dot{s}p} = I_b = 3,18 \text{ A} \quad (3.19)$$

Ztrátový výkon tranzistorů je vypočítán pomocí rovnice (3.17):

$$P_{Q,ztr} = R_{DS,on} \cdot I_{D,ef}^2 + f \cdot \frac{1}{4} \cdot U_n \cdot I_b \cdot (t_r + t_f)$$
$$P_{Q,ztr} = 0,27 \cdot 3,18^2 + 30 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{4} \cdot 70 \cdot 3,18 \cdot (15 + 25) \cdot 10^{-9}$$
$$P_{Q,ztr} = 2,8 \text{ W}$$

Z hlediska napěťových a proudových poměrů vyhovují navržené spínací tranzistory Q1, Q2 a jejich nulové diody D1, D2 pro obě hodnoty napájecího napětí měniče  $U_n$ . Maximální hodnota výkonové ztráty tranzistorů Q1, Q2 je  $P_{Q,ztr} = 2,8$  W a u diody je tato hodnota  $P_{D,ztr} = 1,9$  W.

### 3.4.2 Návrh chlazení spínacích tranzistorů a diod

Spínací tranzistor a jeho nulová dioda jsou umístěny na společném chladiči. Z důvodu vzájemného galvanického oddělení pouzder tranzistoru a diody je nutné použít izolační podložky. Použité izolační podložky mají tepelný odpor  $R_{\vartheta,ch} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ . Z důvodu nedokonalého přestupu tepla mezi podložkou a pouzdem, resp. chladičem je ve výpočtu tato hodnota vynásobena bezpečnostním koeficientem  $k_{bezp} = 1,1$ . Vypočtené ztrátové výkony tranzistoru i diody jsou taktéž z důvodu bezpečnosti návrhu chlazení navýšeny bezpečnostním koeficientem. Náhradní schéma pro výpočet chladiče je znázorněno na Obr. 3.6. Uvažovaná teplota okolí je  $\vartheta_o = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

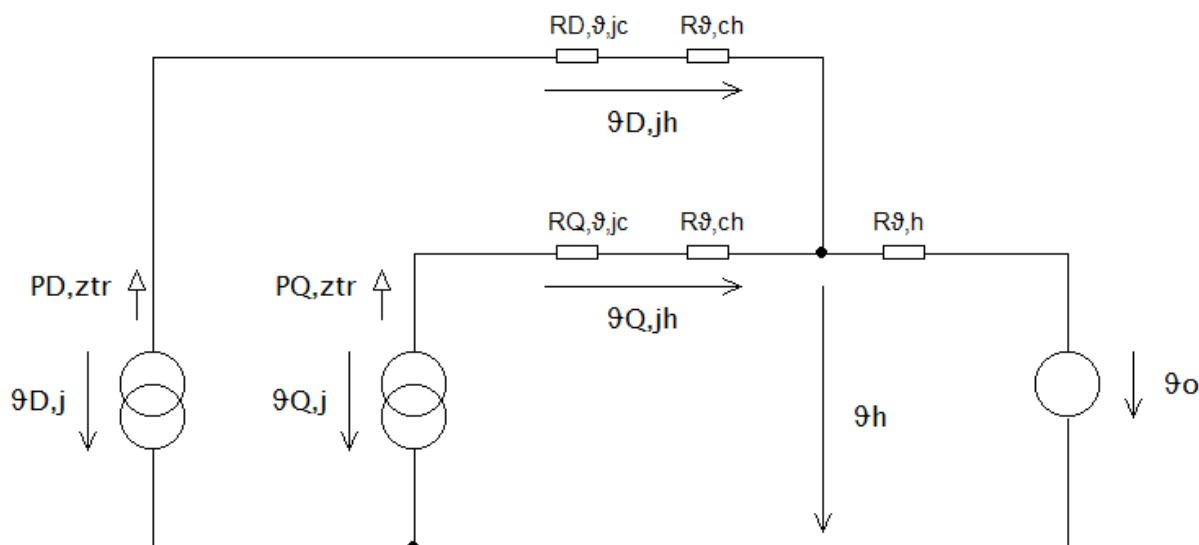
Rozdíl teplot mezi přechodem a chladičem u tranzistorů  $\vartheta_{Q,jh}$  a u diod  $\vartheta_{D,jh}$  je:

$$\vartheta_{Q,jh} = P_{Q,ztr} \cdot k_{bezp} \cdot (R_{Q,\vartheta,jc} + R_{\vartheta,ch} \cdot k_{bezp}) \quad (3.20)$$

$$\vartheta_{Q,jh} = 2,8 \cdot 1,1 \cdot (0,6 + 0,5 \cdot 1,1) = 3,54 \doteq 4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{D,jh} = P_{D,ztr} \cdot k_{bezp} \cdot (R_{D,\vartheta,jc} + R_{\vartheta,ch} \cdot k_{bezp}) \quad (3.21)$$

$$\vartheta_{D,jh} = 1,9 \cdot 1,1 \cdot (1,5 + 0,5 \cdot 1,1) = 4,28 \doteq 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obr. 3.6: Náhradní schéma pro výpočet chladičů v hlavních větvích měniče

Rozdíl teplot je větší u diody. Maximální teplota chladiče  $\vartheta_h$  je tedy omezena maximální teplotou přechodu diody  $\vartheta_{D,j,max}$ :

$$\vartheta_h = \vartheta_{D,j,max} - \vartheta_{D,jh} = 150 - 4,5 = 145,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.22)$$

Minimální tepelný odpor chladiče je:

$$R_{\vartheta,h} = \frac{\vartheta_h - \vartheta_o}{(P_{Q,ztr} + P_{D,ztr}) \cdot k_{bezp}} = \frac{145,5 - 40}{(2,8 + 1,9) \cdot 1,1} = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \quad (3.23)$$

Jako chladiče jsou použity chladiče z bývalého počítačového zdroje.

### 3.5 Návrh vybíjecí větve měniče

Vybíjecí větev slouží k pohlcení energie, která se při demagnetizaci brzdy vrací do stejnosměrného meziobvodu měniče. Při návrhu bylo nutné uvažovat aktuální stav, kdy je měnič napájen ze zdroje 70 V. Tento zdroj má filtrační kondenzátory na výstupu, jejichž maximální napětí je 100 V. Napětí v meziobvodu tedy nesmí vzrůst nad tuto hodnotu. Dále je nutné zajistit, aby proud odebíraný vybíjecím odporem byl větší, než je proud přitékající do měniče ze zátěže. Byl tedy zvolen odpor velikosti  $R_{br} = 18 \text{ } \Omega$ .

Vybíjecí větev je řízena komparátorem s hysterezí, který porovnává napětí v meziobvodu s referenční hodnotou nastavitelnou pomocí trimru P1. Jako hodnota, při které dojde k překlopení komparátoru a sepnutí vybíjecího tranzistoru je nastavena hodnota  $U_{DC,th} = 95 \text{ V}$ .

Při tomto napětí je vybíjecí proud:

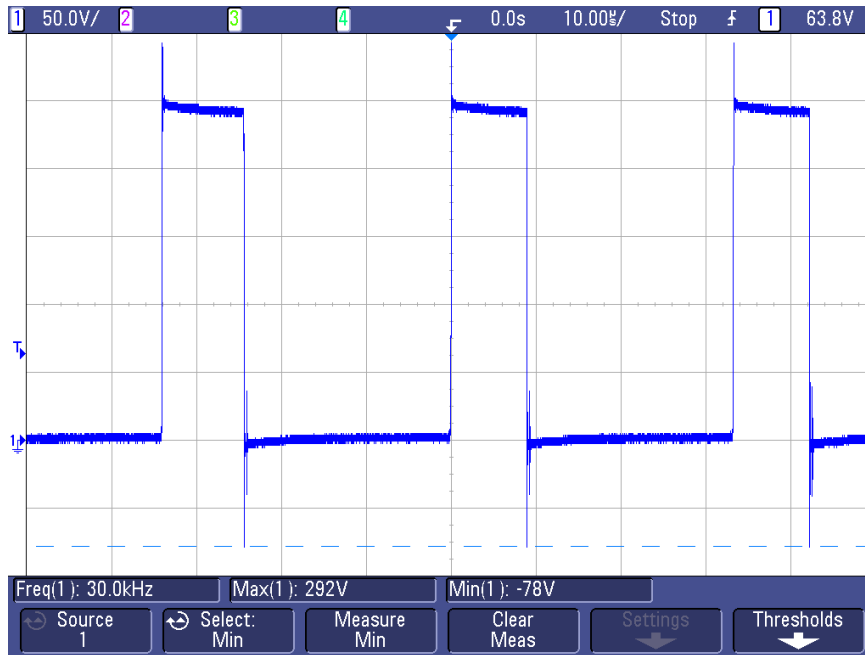
$$I_{br} = \frac{U_{DC,th}}{R_{br}} = \frac{95}{18} = 5,28 \text{ A} \quad (3.24)$$

Tato hodnota je větší, než uvažovaný výstupní proud měniče  $I_b = 4 \text{ A}$ , takže při sepnutí vybíjecí větve nemůže napětí v meziobvodu dále narůstat.

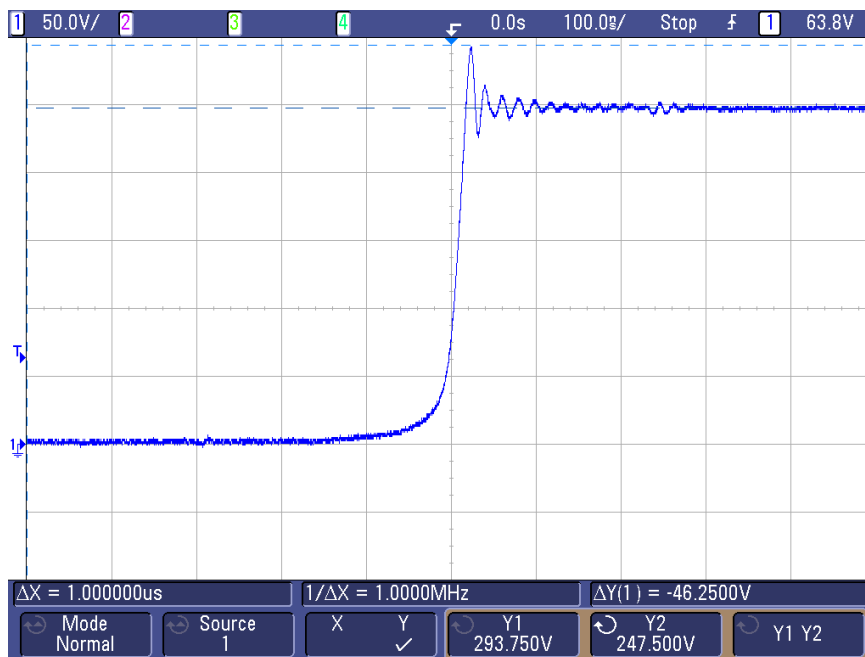
### 3.6 Funkční zkouška měniče

V laboratoři byl měnič otestován s náhradní zátěží, kterou tvořil reostat v sérii s indukčností cca 100 mH. Při funkční zkoušce byl měnič napájen ze zdroje o napětí 250 V a výstupní proud do zátěže byl 4,5 A. Při této zkoušce se teplota chladičů hlavních větví ustálila na cca 50 °C. Jelikož je jmenovitý proud brzdy  $I_{IVD} = 2$  A a není v plánu tento proud dlouhodobě překračovat, lze považovat chlazení hlavních větví za dostatečné.

Při funkční zkoušce byl také osciloskopem měřen průběh napětí  $U_{DS}$  na dolním spínacím tranzistoru Q2. Naměřené průběhy jsou uvedeny na Obr. 3.7 a Obr. 3.8.



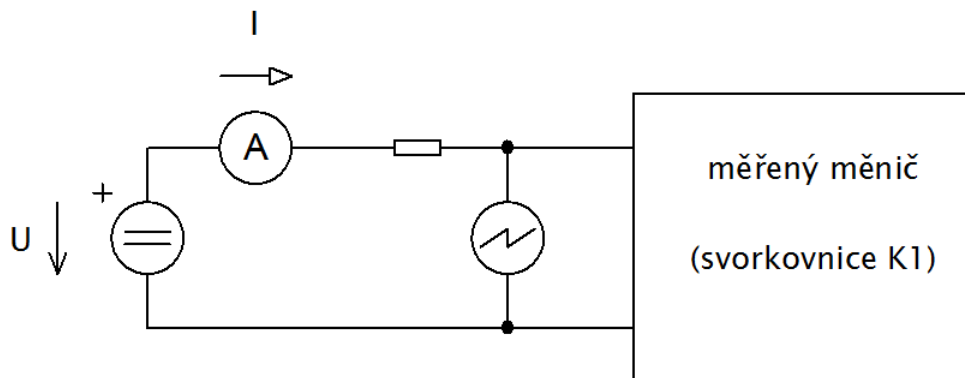
Obr. 3.7: Napětí  $U_{DS}$  na tranzistoru Q2



Obr. 3.8: Napětí  $U_{DS}$  na tranzistoru Q2 (náběžná hrana při vypnutí tranzistoru)

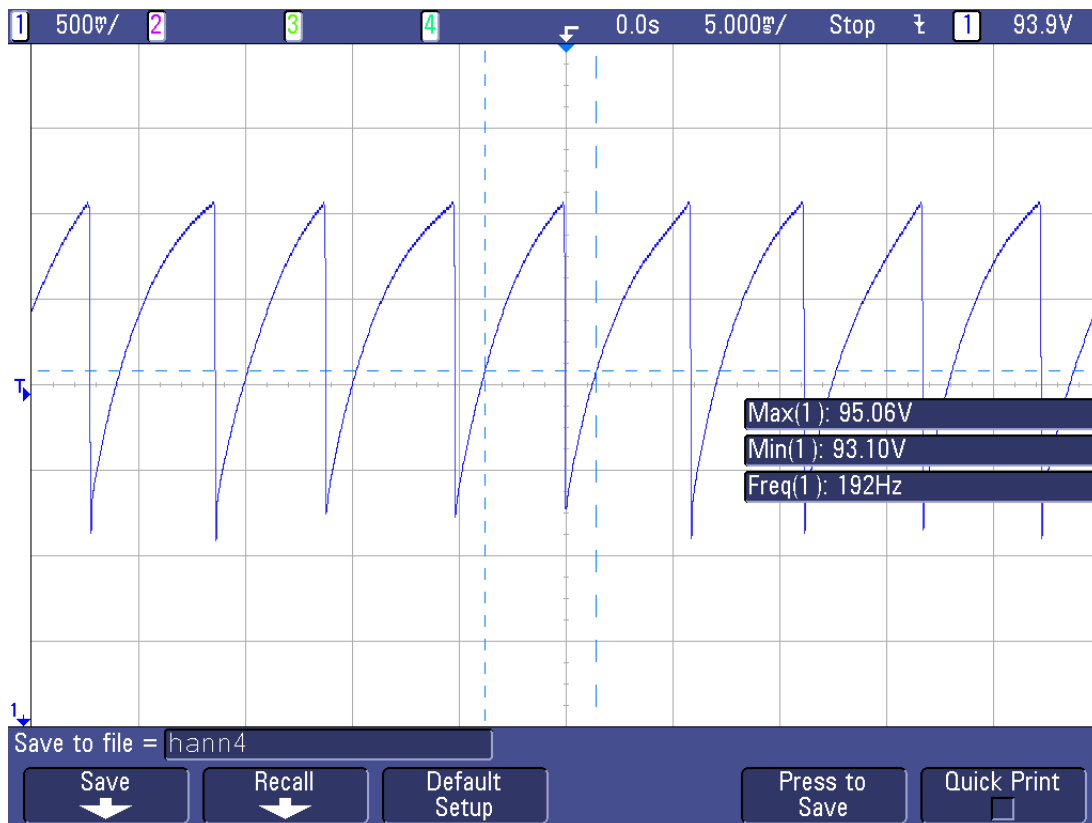
Při vypínání tranzistoru vzniká překmit napětí cca 50 V, který špičkově zvyšuje napětí  $U_{DS}$  na asi 300 V. Maximální dovolené napětí použitého tranzistoru je  $U_{DS,max} = 500$  V [14], takže tranzistor je napětově dimenzován s dostatečnou rezervou.

Dále byla při funkční zkoušce testována funkce vybíjecího obvodu. Schéma zapojení při testování je uvedeno na Obr. 3.9. K měření byl použit externí zdroj, který byl přes odpor připojen ke stejnosměrnému meziobvodu měniče (svorkovnice K1).



Obr. 3.9: Schéma zapojení při testování funkce vybíjecího obvodu

Průběh napětí v meziobvodu změřený osciloskopem na svorkovnici K1 při proudu  $I = 60$  mA je vyobrazen na Obr. 3.10. Z naměřeného průběhu vyplývá, že vybíjecí větev se spíná při napětí v meziobvodu 95 V a vypíná při napětí 93 V. Vybíjecí větev tedy pracuje správně.

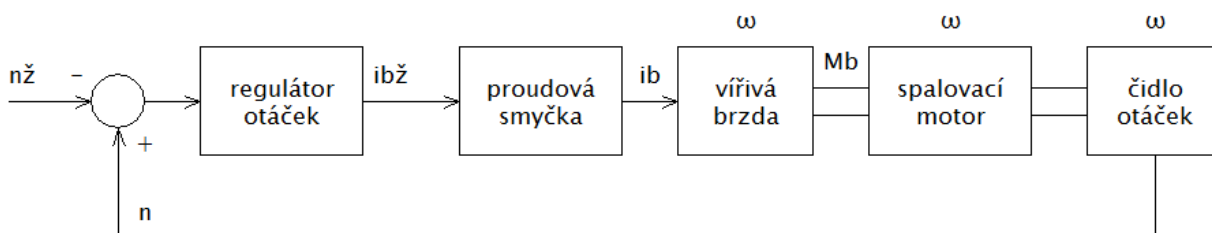


Obr. 3.10: Průběh napětí meziobvodu při  $I = 60$  mA



## 4 REGULACE

Dynamometr bude používán k měření momentu spalovacího motoru v režimu konstantních otáček. Použitá regulační struktura je na Obr. 4.1. Sestává se z regulátoru otáček s podřazenou proudovou smyčkou. Proudová smyčka je tvořena regulátorem proudu, tranzistorovým měničem a budícím vinutím vířivé brzdy. Brzda, spalovací motor a čidlo otáček jsou spojeny hřídelí a otáčí se stejnou úhlovou rychlostí  $\omega$ . Úhlová rychlost této soustavy je měřena pomocí čidla otáček, jehož výstupem je hodnota otáček  $n$  v  $[\text{min}^{-1}]$ , která tvoří zpětnou vazbu otáčkového regulátoru.

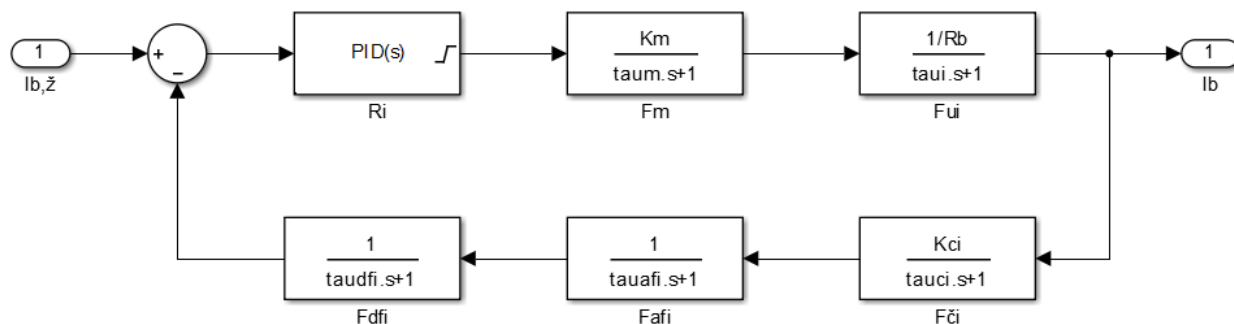


Obr. 4.1: Princip regulátoru otáček brzdy

Při návrhu regulátorů se postupuje směrem od vnitřních (podřazených) smyček směrem k vnějším (nadřazeným). Je tedy nutné vypočítat nejprve regulátor proudu a ověřit chování proudové smyčky. Následně je možné navrhnout regulátor otáček a vyšetřit chování celé soustavy.

### 4.1 Proudová smyčka

Proudová smyčka se skládá z regulátoru proudu, tranzistorového měniče, budícího vinutí brzdy, čidla proudu, RC filtru analogového signálu vystupujícího z čidla proudu a FIR filtru změřené hodnoty proudu. Blokové schéma proudové smyčky je znázorněno na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Blokové schéma podřazené regulační smyčky proudu

Pro návrh regulátoru proudu je nutné nejdříve matematicky popsat jednotlivé bloky ve smyčce. Pro popis lze použít diferenciální rovnice. Podle prvního a druhého Kirchhoffova zákona pro napětí a proud v budícím vinutí platí:

$$u_b(t) = R_b i_b(t) + L_b \frac{di_b(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Tuto rovnici je možné přetransformovat z časové oblasti do oblasti operátorové:

$$U_b(p) = R_b I_b(p) + p L_b I_b(p) \quad (4.2)$$

$$U_b(p) = I_b(p) \cdot (R_b + pL_b)$$

Přenosová funkce budícího vinutí  $F_{ui}(p)$  je tedy:

$$F_{ui}(p) = \frac{I_b(p)}{U_b(p)} = \frac{1}{R_b + pL_b} = \frac{\frac{1}{R_b}}{1 + p\frac{L_b}{R_b}} = \frac{\frac{1}{R_b}}{1 + p\tau_l} \quad (4.3)$$

kde jako  $\tau_l$  je použita menší změřená časová konstanta  $\tau_{l,off}$ .

Zjednodušená přenosová funkce měniče se uvažuje jako:

$$F_m(p) = \frac{K_m}{1 + p\tau_m} \quad (4.4)$$

kde  $K_m$  je zesílení měniče a  $\tau_m$  náhradní časová konstanta měniče.

PWM modulátor v mikroprocesoru pracuje tak, že střída sepnutí tranzistorů ( $0 \div 100$ ) % odpovídá vstupní hodnotě  $u_{b,z}$  ( $0 \div 1400$ ). Při napájení měniče napětím  $U_n = 70$  V a použité topologii měniče tedy mimo režim přerušovaných proudů může výstupní napětí měniče nabývat hodnot  $u_b$  ( $-70 \div 70$ ) V. Pro  $K_m$  tedy platí:

$$K_m = \frac{u_b}{u_{b,z}} = \frac{(-70 \div 70)}{(0 \div 1400)} = 0,1 \quad (4.5)$$

Pro náhradní časovou konstantu měniče  $\tau_m$  platí:

$$\tau_m = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2 \cdot 30 \cdot 10^3} = 16,67 \mu\text{s} \quad (4.6)$$

Přenosová funkce čidla proudu je definována jako:

$$F_{\check{c}i}(p) = \frac{K_{\check{c}i}}{1 + p\tau_{\check{c}i}} \quad (4.7)$$

kde  $K_{\check{c}i}$  je zesílení čidla proudu a  $\tau_{\check{c}i}$  časová konstanta čidla proudu.

Použité čidlo proudu je ACS712 firmy Allegro MicroSystems a podle katalogu má časovou konstantu  $\tau_{\check{c}i} = 5,8 \mu\text{s}$  [17]. Vyhodnocování signálu z proudového čidla je řešeno tak, že vstupní proměnná regulátoru s měřenou hodnotou proudu obsahuje přímo změřenou hodnotu v [mA]. Zesílení čidla proudu pro výpočet regulátoru je tedy  $K_{\check{c}i} = 1000$ .

Přenos RC filtru signálu z analogového čidla proudu:

$$F_{afi}(p) = \frac{1}{1 + p\tau_{afi}} \quad (4.8)$$

kde  $\tau_{afi} = 200 \mu\text{s}$ .

Přenos FIR filtru změřené hodnoty proudu:

$$F_{dfi}(p) = \frac{1}{1 + p\tau_{dfi}} \quad (4.9)$$

kde  $\tau_{dfi} = 500 \mu\text{s}$ .

Přenos regulované soustavy se vypočítá jako:

$$F_S(p) = F_{ui}(p) \cdot F_m(p) \cdot F_{\check{c}i}(p) \cdot F_{afi}(p) \cdot F_{dfi}(p) \quad (4.10)$$

$$F_S(p) = \frac{1}{R_b} \cdot \frac{K_m}{1 + p\tau_l} \cdot \frac{K_{\check{c}i}}{1 + p\tau_m} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{\check{c}i}} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{afi}} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_{dfi}}$$

$$F_S(p) = \frac{\frac{1}{R_b} K_m K_{\check{c}i}}{(1 + p\tau_l)(1 + p\tau_m)(1 + p\tau_{\check{c}i})(1 + p\tau_{afi})(1 + p\tau_{dfi})} \quad (4.11)$$

Protože soustava neobsahuje žádný volný integrátor, pro výpočet regulátoru je vhodná metoda optimálního modulu. Přenosovou funkci regulátoru proudu lze vypočítat podle vztahu [16]:

$$R_I(p) = F_{OM}(p) \frac{1}{F_S(p)} \quad (4.12)$$

Kde  $F_{OM}(p)$  je standardní tvar přenosu otevřené smyčky pro metodu OM [16]:

$$F_{OM}(p) = \frac{1}{2\tau_\sigma p(1 + p\tau_\sigma)} \quad (4.13)$$

Dosazením (4.11) a (4.13) do (4.12) vypočítáme regulátor:

$$R_I(p) = \frac{1}{2\tau_\sigma p(1 + p\tau_\sigma)} \cdot \frac{(1 + p\tau_l)(1 + p\tau_m)(1 + p\tau_{\check{c}i})(1 + p\tau_{afi})(1 + p\tau_{dfi})}{\frac{1}{R_b} K_m K_{\check{c}i}} \quad (4.14)$$

Jelikož platí:

$$\tau_l \gg \tau_{dfi} > \tau_{afi} \gg \tau_m + \tau_{\check{c}i} \quad (4.15)$$

lze zanedbat  $\tau_m$ ,  $\tau_{\check{c}i}$  a zavést zjednodušení:

$$R_I(p) = \frac{1}{2\tau_\sigma p(1 + p\tau_\sigma)} \cdot \frac{(1 + p\tau_l)(1 + p\tau_\sigma)}{\frac{1}{R_b} K_m K_{\check{c}i}} \quad (4.16)$$

kde:

$$\tau_\sigma = \tau_{dfi} + \tau_{afi} = 500 + 200 = 700 \mu\text{s} \quad (4.17)$$

Po vykrácení závorek v (4.16) a dosazení získáme:

$$R_I(p) = \frac{1}{2\tau_\sigma p} \cdot \frac{(1 + p\tau_l)}{\frac{1}{R_b} K_m K_{\check{c}i}} = \frac{1 + p\tau_l}{2\tau_\sigma p \cdot \frac{K_m K_{\check{c}i}}{R_b}} \quad (4.18)$$

$$R_I(p) = \frac{1 + 0,36p}{2p \cdot 700 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,1 \cdot 1000}{22}} = \frac{1 + 0,36p}{6,3636 \cdot 10^{-3}p}$$

$$R_I(p) = 56,6 + \frac{157}{p}$$

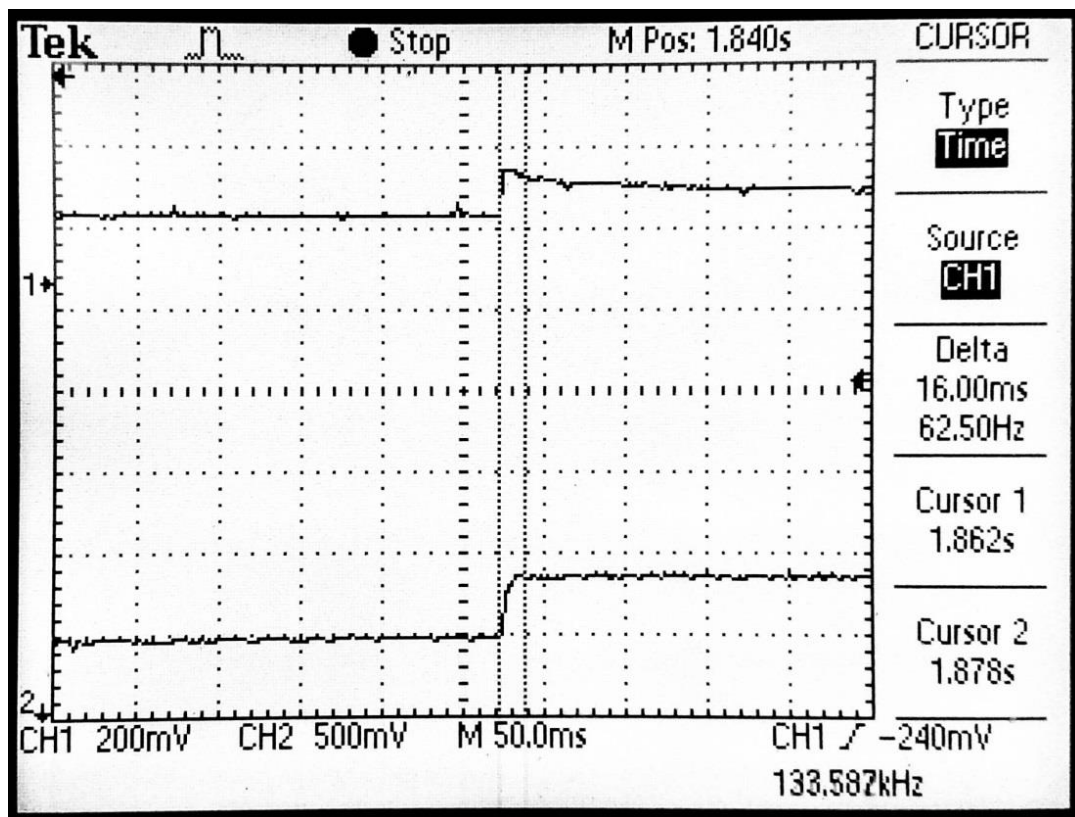
Vypočítaný regulátor proudu je typu PI.

Žádaná hodnota proudu  $i_{b,z}$  vstupující do regulátoru proudu má rozměr [mA].

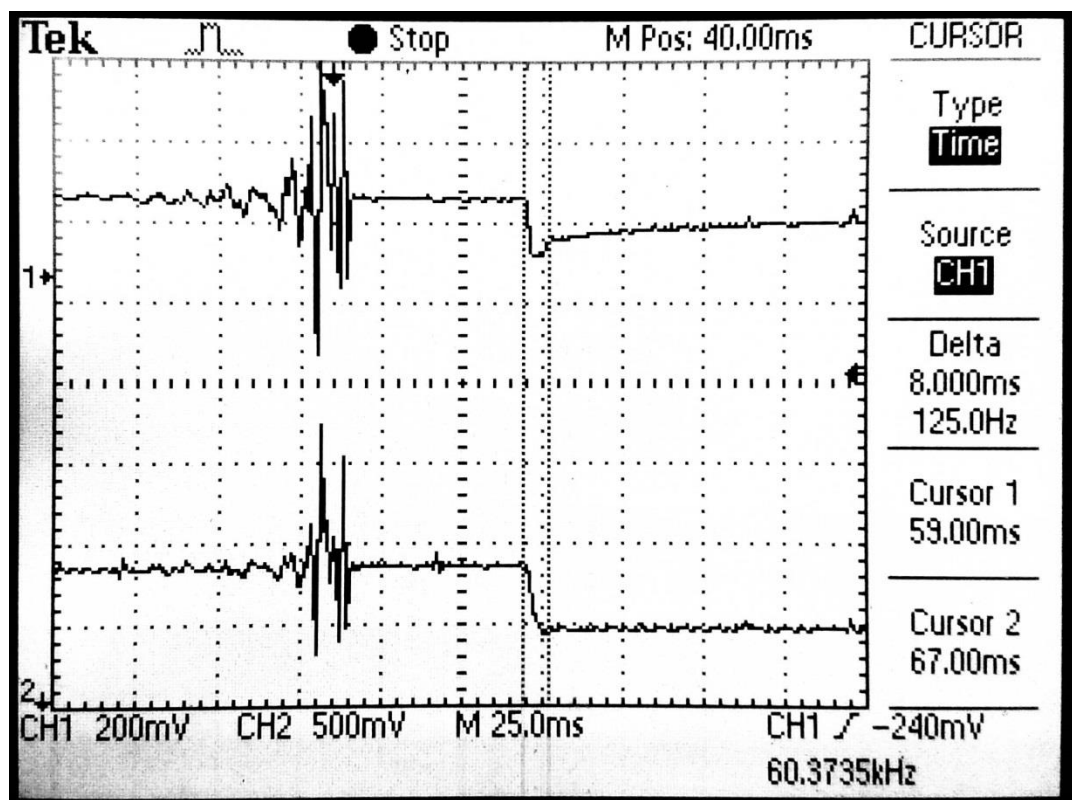
#### 4.1.1 Realizace proudového regulátoru pomocí mikropočítače Arduino DUE a ověření jeho funkce

Proudový regulátor byl realizován pomocí knihovny *Arduino PID Library* [18]. Proud je měřen pomocí ADC převodníku, kde je konverze spouštěna s frekvencí 15 kHz. Změřené hodnoty jsou ukládány do kruhového registru. Výpočet regulátoru proudu je spouštěn s frekvencí 1 kHz a jako vstupní hodnota proudu je použita průměrná hodnota z posledních 15 naměřených hodnot.

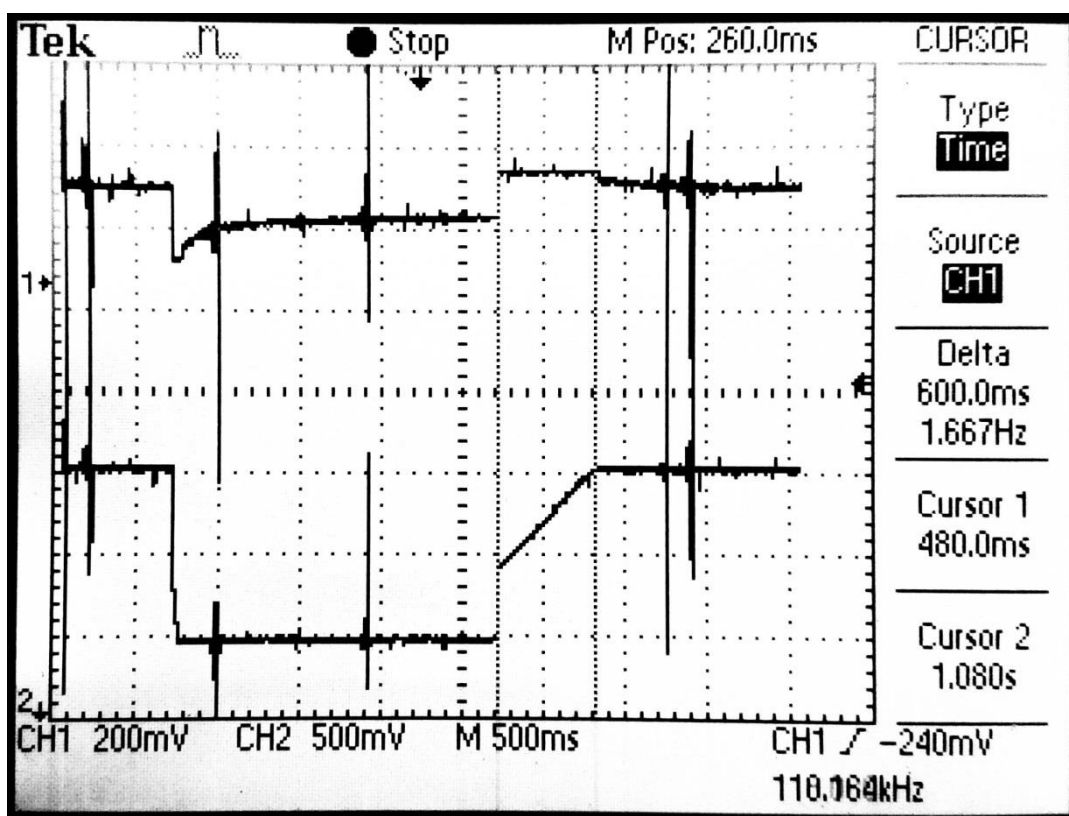
Funkce regulátoru proudu byla ověřována pomocí obdélníkového signálu s parametry  $i_{b,z,min} = 100$  mA,  $i_{b,z,max} = 800$  mA,  $f = 0,5$  Hz, který byl přiveden do regulátoru proudu jako žádaná hodnota. Při zkoušce proudové smyčky s vypočítanými konstantami z kapitoly 4.1 bylo zjištěno, že soustava je nestabilní a silně kmitá. Integrační konstanta regulátoru tedy byla nastavena na  $I_I = 0$  a postupným zkoušením bylo zjištěno, že soustava začíná kmitat při nastavení proporcionální konstanty na  $P_I = 3$ . Jako proporcionální konstanta byla tedy použita hodnota  $P_I = 1$ . Poté byla zjištěna optimální hodnota integrační konstanty  $I_I = 1200$ . Při tomto nastavení byla soustava stabilní. Naměřené průběhy střídny a proudu jsou na Obr. 4.3 a Obr. 4.4. Naměřené průběhy pro  $i_{b,z,min} = 100$  mA a  $i_{b,z,max} = 2000$  mA jsou uvedeny na Obr. 4.5 a Obr. 4.6.



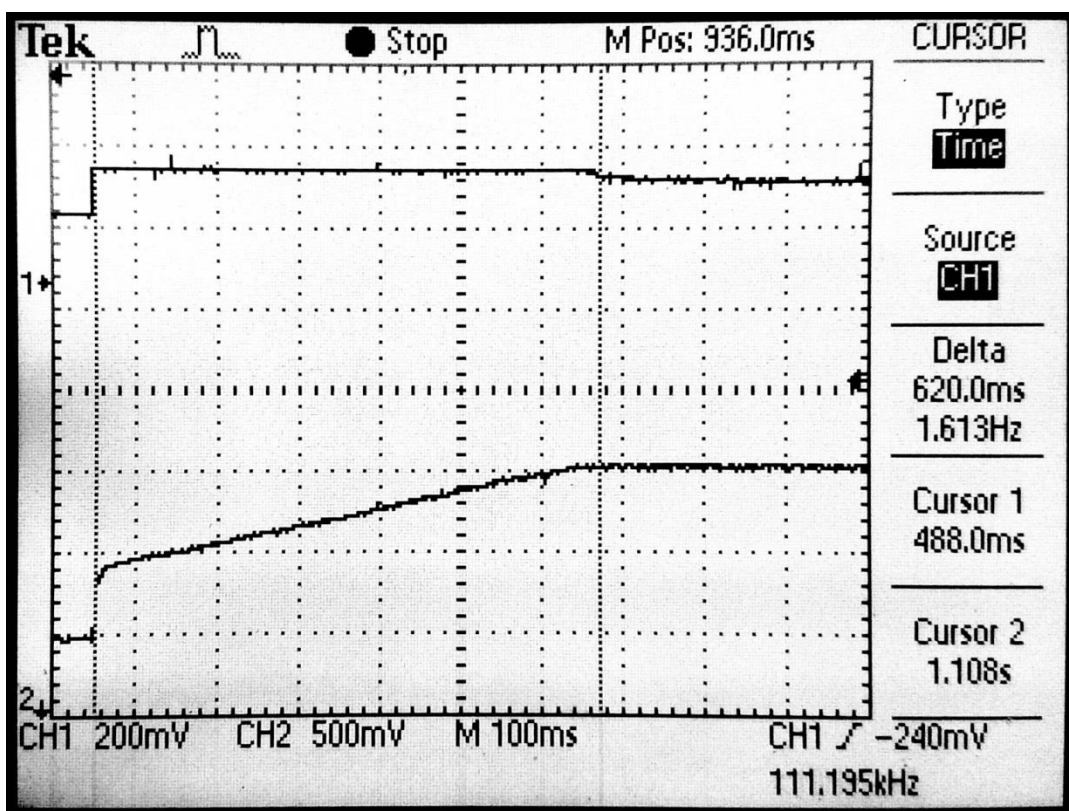
Obr. 4.3: Průběh střídavy (nahore) a proudu (dole) při přechodu z  $i_{b\dot{z},min} = 100 \text{ mA}$  na  $i_{b\dot{z},max} = 800 \text{ mA}$



Obr. 4.4: Průběhy střídavy (nahore) a proudu (dole) při přechodu z  $i_{b\dot{z},max} = 800 \text{ mA}$  na  $i_{b\dot{z},min} = 100 \text{ mA}$



Obr. 4.5: Průběhy střídý (nahore) a proudu (dole) při přechodu z  $i_{b\dot{z},min} = 100 \text{ mA}$  na  $i_{b\dot{z},max} = 2000 \text{ mA}$



Obr. 4.6: Průběhy střídý (nahore) a proudu (dole) při přechodu z  $i_{b\dot{z},min} = 100 \text{ mA}$  na  $i_{b\dot{z},max} = 2000 \text{ mA}$  (detail)

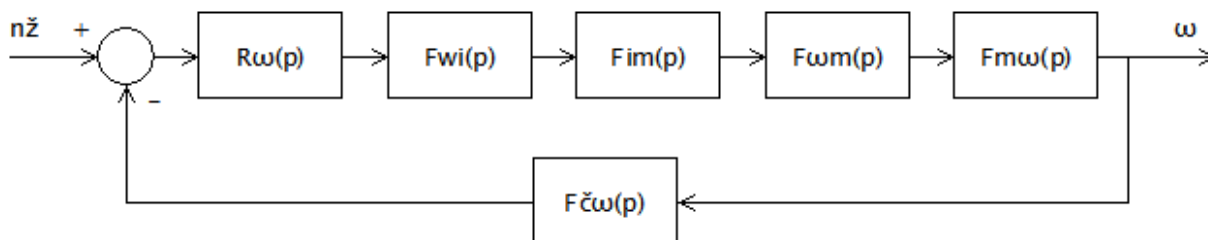
Jak vyplývá z Obr. 4.3 až Obr. 4.6, regulátor proudu pracuje správně. Na průbězích lze ale při saturaci pozorovat jev, kdy při požadavku na zvýšení proudu skutečný proud brzdou prudce vzroste a teprve poté lineárně narůstá s konstantní strmostí až do požadované hodnoty. Toto chování neodpovídá teoretickému modelu brzdy jako velké indukčnosti v sérii s rezistorem a bylo by možné jej vysvětlit následujícími způsoby:

- indukčnost vinutí je silně nelineární
- předpokládaný model vinutí tvořený indukčností v sérii s rezistorem je přemostěn dalším rezistorem

Tato skutečnost nebyla uvažována v matematickém modelu proudové smyčky a kvůli tomu konstanty  $P_I$ ,  $I_I$  funkčního regulátoru proudu neodpovídají teoretickému výpočtu.

## 4.2 Otáčková smyčka

Otáčková smyčka se skládá z regulátoru otáček, podřazené proudové smyčky, brzdy, bloku, který zahrnuje předpokládaný moment setrvačnosti měřeného soustrojí brzdy a měřeného motoru, z čidla otáček a filtru naměřené hodnoty otáček. Zjednodušené blokové schéma otáčkové smyčky pro výpočet regulátoru je znázorněno na Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Zjednodušené blokové schéma otáčkové smyčky pro výpočet regulátoru

Přenosovou funkci proudové smyčky lze zjednodušit do následujícího tvaru:

$$F_{wi}(p) = \frac{K_{wi}}{1 + p\tau_{wi}} \quad (4.19)$$

kde  $K_{wi} = 10^{-3}$  je zesílení proudové smyčky a  $\tau_{wi}$  je náhradní časová konstanta proudové smyčky. Pro  $\tau_{wi}$  platí:

$$\tau_{wi} = 2 \cdot \tau_{\sigma} = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ ms} \quad (4.20)$$

kde  $\tau_{\sigma}$  je součtová časová konstanta proudové smyčky.

Koeficient převodu budícího proudu  $I_b$  na moment brzdy  $M_b$  je:

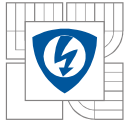
$$F_{im}(p) = \frac{M_{1VD,max}}{I_{1VD}} = \frac{424,28}{2} = 212,14 \quad (4.21)$$

Tato hodnota byla určena z charakteristiky viz Obr. 1.6 [9].

Koeficient převodu úhlové rychlosti  $\omega$  na moment brzdy  $M_b$  byl také určen z charakteristiky viz Obr. 1.6 [9] a jeho hodnota je:

$$F_{\omega m}(p) = 0,9 \quad (4.22)$$

Závislost otáček soustrojí na působícím momentu je popsána přenosovou funkcí:



$$F_{m\omega}(p) = \frac{1}{p(J_{1VD} + J_m)} = \frac{1}{p(1,88 + 0,4)} = \frac{1}{p \cdot 2,28} \quad (4.23)$$

kde  $J_m$  je předpokládaný moment setrvačnosti měřeného spalovacího motoru.

Působení statického momentu měřeného spalovacího motoru je považováno za poruchu působící na soustavu a není tedy nijak zahrnuto do výpočtu regulátoru. Dynamický moment motoru vzniklý momentem setrvačnosti je zahrnut v konstantě  $J_m$ .

Přenos čidla otáček:

$$F_{\check{\omega}}(p) = \frac{K_{\check{\omega}}}{1 + p\tau_{\check{\omega}}} \quad (4.24)$$

kde:

$$K_{\check{\omega}} = \frac{60}{2\pi}$$

a  $\tau_{\check{\omega}} = 25$  ms.

Přenos regulované soustavy se vypočítá jako:

$$F_S(p) = F_{wi}(p) \cdot F_{im}(p) \cdot F_{\omega m}(p) \cdot F_{m\omega}(p) \cdot F_{\check{\omega}}(p) \quad (4.25)$$

$$F_S(p) = \frac{10^{-3}}{1 + p\tau_{wi}} \cdot 212,14 \cdot 0,9 \cdot \frac{1}{p \cdot 2,28} \cdot \frac{60}{2\pi}$$

$$F_S(p) = \frac{0,8}{p(1 + p\tau_{wi})(1 + p\tau_{\check{\omega}})} \quad (4.26)$$

Protože soustava obsahuje volný integrátor, pro výpočet regulátoru je vhodná metoda symetrického optima. Přenosovou funkci regulátoru proudu lze vypočítat podle vztahu [16]:

$$R_\omega(p) = F_{SO}(p) \frac{1}{F_S(p)} \quad (4.27)$$

Kde  $F_{SO}(p)$  je standardní tvar přenosu otevřené smyčky pro metodu SO [16]:

$$F_{SO}(p) = \frac{1 + 4p\tau_\sigma}{8\tau_\sigma^2 p^2 (1 + p\tau_\sigma)} \quad (4.28)$$

Dosazením (4.26) a (4.28) do rovnice (4.27) vypočítáme přenos regulátoru:

$$R_\omega(p) = \frac{1 + 4p\tau_\sigma}{8\tau_\sigma^2 p^2 (1 + p\tau_\sigma)} \cdot \frac{p(1 + p\tau_{wi})(1 + p\tau_{\check{\omega}})}{0,8} \quad (4.29)$$

Jelikož platí:

$$\tau_{wi} < \tau_{\check{\omega}} \quad (4.30)$$

Lze zavést zjednodušení:

$$\tau_\sigma = \tau_{wi} + \tau_{\check{\omega}} = 1,4 + 25 = 26,4 \text{ ms} \quad (4.31)$$

Rovnice (4.29) se tedy zjednoduší do tvaru:



$$R_{\omega}(p) = \frac{1 + 4p\tau_{\sigma}}{8\tau_{\sigma}^2 p^2 (1 + p\tau_{\sigma})} \cdot \frac{p(1 + p\tau_{\sigma})}{0,8} \quad (4.32)$$

Po vykrácení závorek v (4.32) získáme:

$$R_{\omega}(p) = \frac{1 + 4p\tau_{\sigma}}{8\tau_{\sigma}^2 p} \cdot \frac{1}{0,8} = \frac{1 + 4p\tau_{\sigma}}{6,4\tau_{\sigma}^2 p} = \frac{1 + 4p \cdot 26,4 \cdot 10^{-3}}{6,4 \cdot (26,4 \cdot 10^{-3})^2 p} \quad (4.33)$$

$$R_{\omega}(p) = \frac{1 + 0,1056p}{4,46 \cdot 10^{-3} p} = 23,67 + \frac{224}{p}$$

Vypočtený regulátor otáček je typu PI.

### 4.2.1 Čidlo otáček

Otáčky soustrojí je nutné měřit z důvodu regulace a také jako výstupní veličinu pro uživatele. Pro potřebu regulace je nutné rychlé měření, protože zpoždění čidla otáček by snižovalo rychlost a stabilitu smyčky. Proti tomu stojí požadavek uživatele, který potřebuje znát skutečné otáčky měřeného motoru co nejpřesněji.

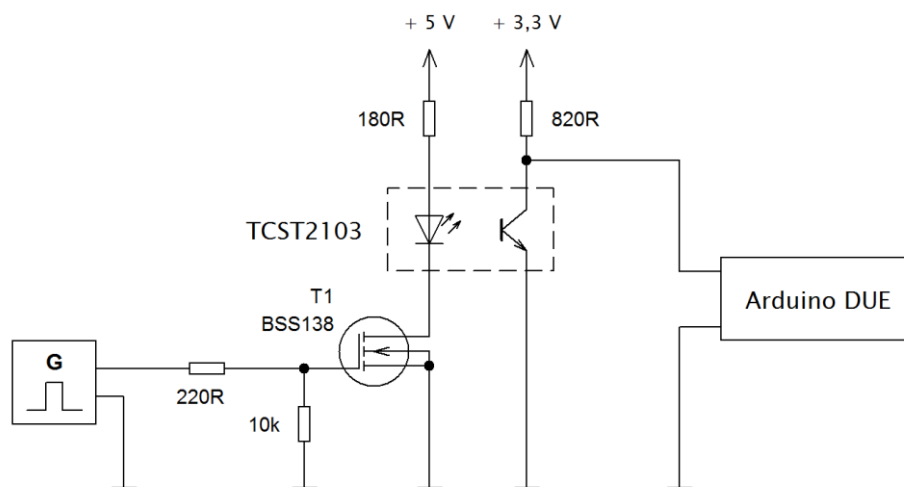
K měření otáček je použito inkrementální čidlo složené z kotouče s 60 zářezy po obvodu a z optozávory TCST2103. Díky vhodnému počtu zářezů na kotouči se otáčky v [ $\text{min}^{-1}$ ] přímo rovnají frekvenci signálu ze snímače v [Hz]. Signál z optozávory je přiveden do mikropočítače na vstup časovače. Druhým vstupem časovače je vnitřní signál o frekvenci  $f_{tim} = 42$  MHz. Při příchodu náběžné hrany z inkrementálního čidla je z časovače odečtena aktuální hodnota čítače  $A_0$  a inkrementována proměnná  $B_0$ . Samotný výpočet je spouštěn s frekvencí 100 Hz a je proveden pomocí vzorce:

$$n = \frac{B_0 - B_1}{A_0 - A_1} \cdot f_{tim} \quad (4.34)$$

kde  $A_1$  a  $B_1$  jsou hodnoty proměnných  $A_0$ ,  $B_0$  z předchozího výpočtu.

Měřená hodnota otáček je dále filtrována. Zde dochází k rozlišení hodnoty pro regulátor a pro zobrazení uživateli. Hodnota pro regulátor je tvořena průměrem z posledních 5 měření, zatímco hodnota pro zobrazení uživateli je průměrována z posledních 50 naměřených hodnot. Součástí algoritmu pro výpočet otáček je také funkce, která jakékoliv otáčky  $n < 2 \text{ min}^{-1}$  vyhodnocuje jako nulové.

Pro ověření funkce a přesnosti čidla bylo provedeno měření, kde byl jako zdroj signálu použit generátor. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 4.8. Na generátoru byl nastaven jako výstupní signál obdélník s parametry  $U_{min} = 0$  V,  $U_{max} = 3,3$  V a byla nastavována jeho frekvence  $f_{nast}$ . Odpovídající hodnoty změřených frekvencí (otáček)  $f_{měř}$  byly odečteny a zapsány do tabulky. Výsledek měření je uveden v Tab. 4.1. Jak vyplývá z měření, přesnost naměřené hodnoty je velmi dobrá. Uživateli dynamometru bude zobrazována pouze změřená hodnota otáček s přesností na jednotky.



Obr. 4.8: Schéma zapojení při měření čidla otáček

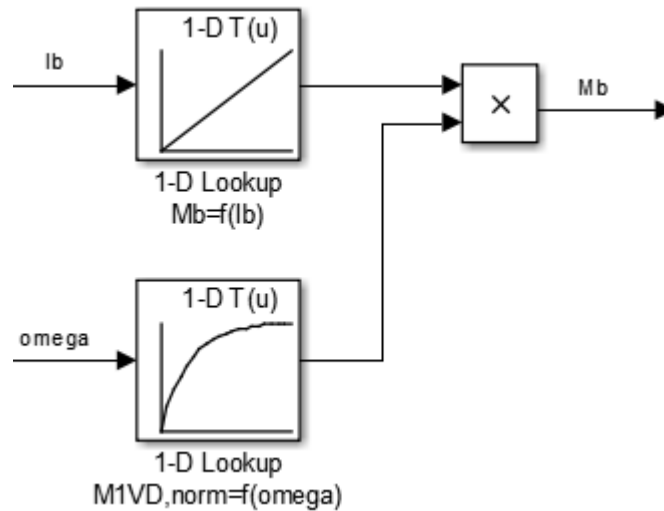
Tab. 4.1: Skutečné a změřené hodnoty při ověřování funkce čidla otáček

$f_{nast}$ [Hz]	$f_{měř}$ [Hz]	$\delta$ [%]
7000,00	7000,24	3,43E-03
6582,00	6582,22	3,34E-03
2258,00	2258,07	3,10E-03
1000,00	1000,03	3,00E-03
526,25	526,26	1,90E-03
247,36	247,36	0
100,04	100,04	0
48,26	48,26	0
14,59	14,59	0
2,02	2,02	0
2,00	2,00	0
1,9999	0,00	-

#### 4.2.2 Realizace otáčkového regulátoru pomocí mikropočítače Arduino DUE a ověření jeho funkce simulací

Otáčkový regulátor byl realizován pomocí knihovny *Arduino PID Library* [18]. Při funkční zkoušce regulačních obvodů bohužel nebylo možné ověřit funkci otáčkové smyčky, protože technici nevedli soustrojí motor – brzda do provozuschopného stavu. Brzda nebyla připojena k chladicí vodě ani k vyvíječům olejové mlhy pro mazání ložisek, takže zkouška by byla pro stroj nebezpečná. Na spalovacím motoru chybělo sací potrubí, rozdělovač a startér. K dispozici jsou tedy pouze výsledky získané simulací v programu MATLAB – SIMULINK.

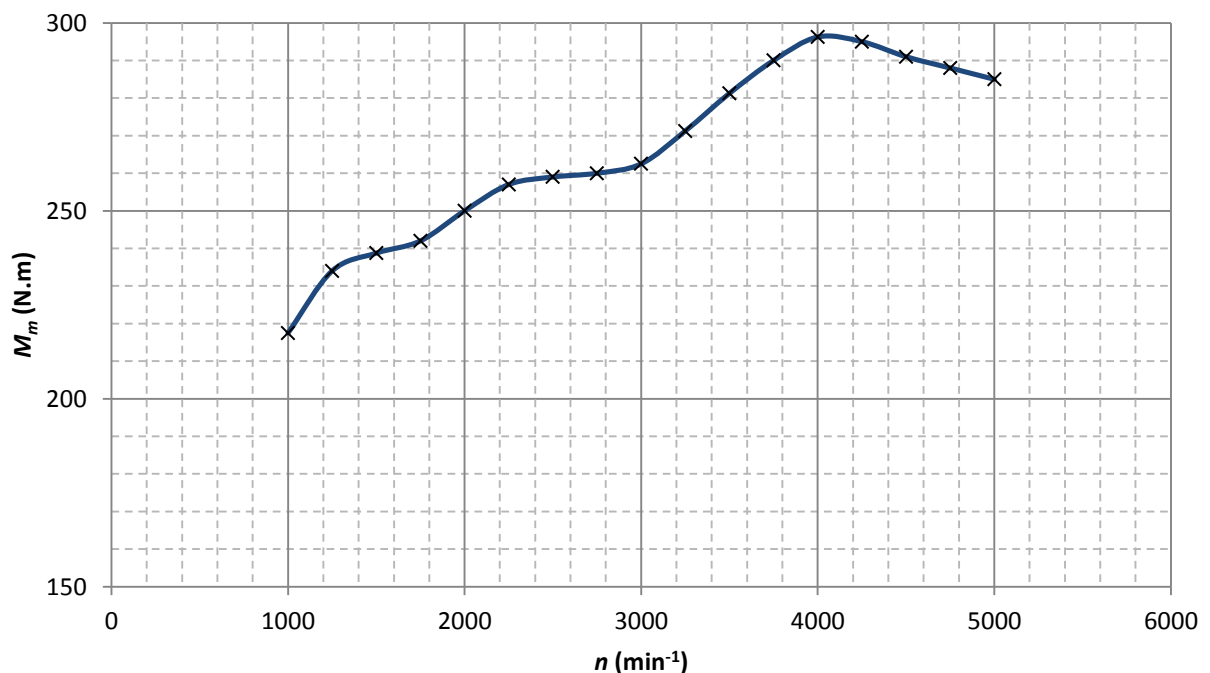
Model použitý pro simulaci je složen z měřeného spalovacího motoru, brzdy, regulátoru otáček, čidla otáček a modelu proudové smyčky. Pro ověření funkce celku bylo nutné zahrnout vliv nelinearit brzdy a také vliv nezanedbatelného momentu spalovacího motoru. Brzda byla namodelována podle schématu na Obr. 4.9.



Obr. 4.9: Matematický model brzdy  
(závislost momentu  $M_b$  na úhlové rychlosti  $\omega$  a budícím proudem  $I_b$ )

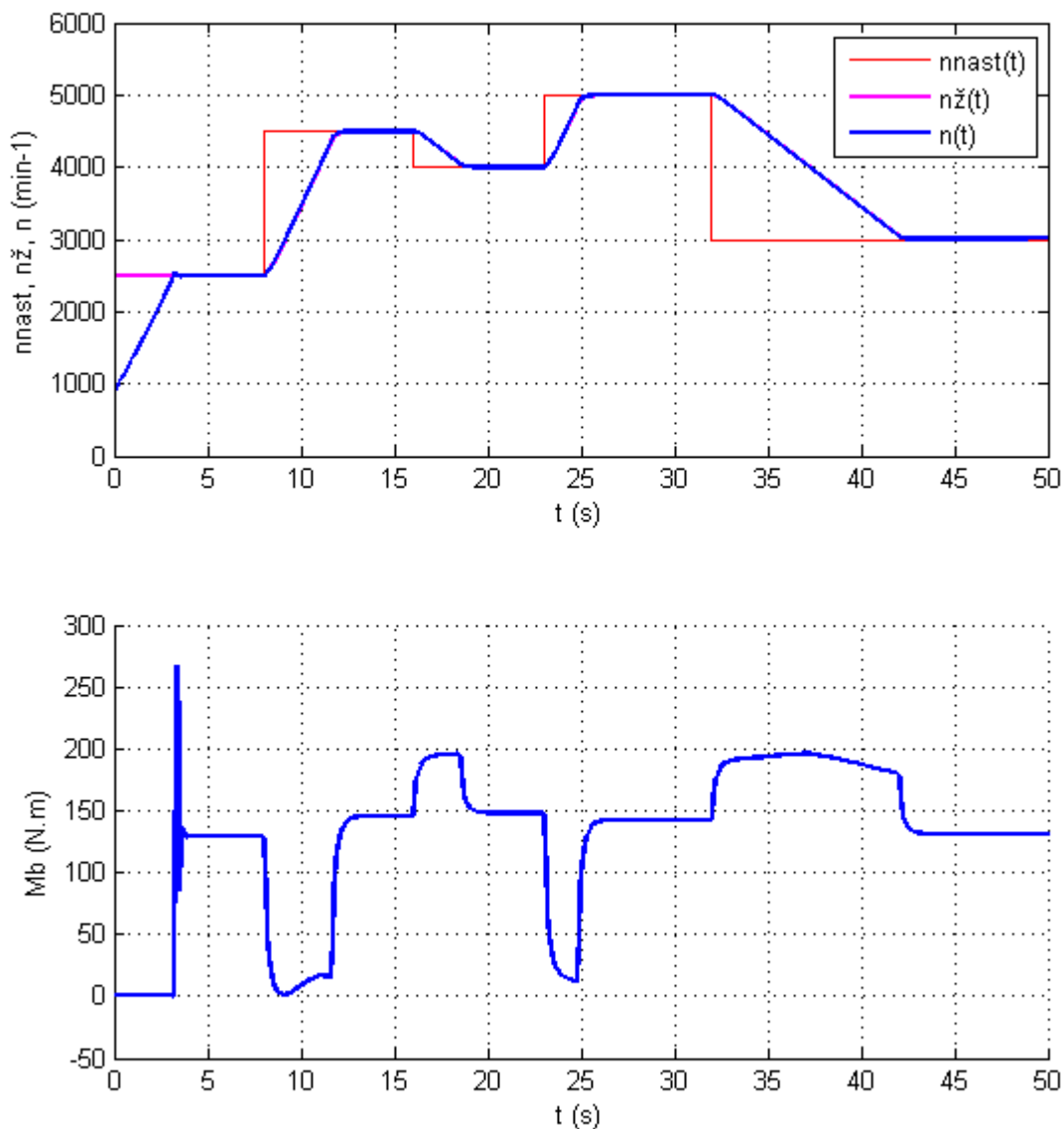
Pomocí budícího proudu  $I_b$ , který má rozsah  $(0 \div I_{IVD})$  je nastaven brzdňý moment  $M_b$  v rozsahu  $(0 \div 424,28)$ , kde hodnota 424,28 je maximální velikost momentu  $M_{IVD}$  odečtená z charakteristiky při otáčkách  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ . Tento brzdňý moment je násoben hodnotou  $M_{IVD,norm}$ , která odpovídá aktuální úhlové rychlosti stroje  $\omega$ .

Jako model spalovacího motoru byla použita vnější otáčková charakteristika zážehového motoru TATRA viz Obr. 4.10.



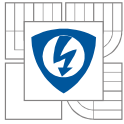
Obr. 4.10: Vnější otáčková charakteristika zážehového motoru TATRA

Kompletní použitý model pro simulaci otáčkové smyčky je uveden v příloze B. Na jeho základě byla v prostředí SIMULINK provedena simulace chování celé soustavy, jejíž výsledky jsou uvedeny na Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Průběhy sledovaných veličin při simulaci celé soustavy s vypočteným regulátorem otáček

Vstupní hodnotou jsou žádané otáčky zadané uživatelem  $n_{nast}$ . Jak lze pozorovat v čase  $t =$  asi 4 s, otáčky soustavy brzda – motor  $n$  dosáhnou požadované hodnoty a regulátor zvýší brzdný moment. Protože ale proudová smyčka není dostatečně rychlá, brzdný moment se nenastaví dostatečně rychle a dojde k překmitu otáček  $n$ . Aby byl tento překmit minimalizován, signál  $n_{nast}$  prochází přes tvarovací obvod, který sníží strmost změny tohoto signálu. Výstupem tvarovacího obvodu jsou vnitřní žádané otáčky  $n_z$  pro regulátor otáček. Maximální strmost změny  $n_z$  je nastavena tak, aby hodnota  $n_z$  nemohla narůstat rychleji, než otáčky soustavy  $n$ . Díky tomu regulátor otáček vždy zajišťuje působení brzdného momentu a nedojde k poklesu proudu  $I_b$  na



---

nulovou hodnotu. Reakce brzdy při dosažení žádaných otáček  $n_{nast}$  je pak rychlejší a překmit menší.

Z výsledků simulace vyplývá, že vypočtený regulátor otáček funguje správně. Jedná se však o simulaci, ve které nejsou zahrnuty všechny charakteristické vlastnosti brzdy (např. chování viz Obr. 1.9 a Obr. 1.10). Je tedy pravděpodobné, že otáčkový regulátor bude nutné odladit na místě stejně jako proudový regulátor.

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout regulační obvody vířivé brzdy, která bude součástí dynamometru pro měření spalovacích motorů. Hlavním důvodem bylo zprovoznění stávajícího stroje, ke kterému chybí původní regulační obvody a který je tedy nepoužitelný.

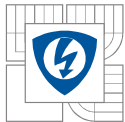
Bakalářská práce obsahuje návrh celkové koncepce elektrického systému budoucího dynamometru, návrh tranzistorového měniče, který slouží k buzení vířivé brzdy a návrh regulačních obvodů. K tomuto návrhu byly použité dosavadní znalosti ze studia VŠ.

První částí práce bylo vyhodnocení elektrických parametrů budícího vinutí vířivé brzdy a nalezení vhodného zdroje sloužícího k napájení tranzistorového měniče. K dispozici je zdroj 70 V DC s dostatečným proudem, který bude sloužit k tomuto účelu. Na základě technické dokumentace k brzdě byly určeny jmenovité parametry tranzistorového měniče. Vzhledem k nízkému napětí použitého napájecího zdroje očekávám potřebu později navrhnout nový spínaný napájecí zdroj. Napětí použitého zdroje 70 V totiž omezuje rychlost proudové smyčky a tím omezuje také dynamiku nastavování budícího momentu. Tranzistorový měnič byl tedy dimenzován s ohledem na tuto skutečnost a počítá s napájecím napětím až 200 V. Návrh tranzistorového měniče pro ovládání vířivé brzdy je jednou z částí této bakalářské práce. Kompletní elektrické schéma měniče a návrh DPS je součástí přílohy.

Druhou částí práce je návrh regulačních obvodů včetně výpočtu parametrů regulátorů. K regulaci brzdy byl zvolen mikropočítač *Arduino DUE*. Tento mikropočítač realizuje algoritmy regulátorů otáček a proudu, generuje PWM signál pro tranzistorový měnič a zpracovává signál z čidla proudu. Jeho výkon a vstupy/výstupy postačují i k budoucímu zpracování signálu z tenzometru měřícího brzdny moment, komunikaci s uživatelem prostřednictvím klávesnice a displeje a také komunikaci s nadřazeným systémem.

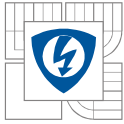
Další nedílnou částí této práce je návrh základové desky pro mikropočítač, která zajišťuje připojení veškerých periférií k mikropočítači. Návrh byl proveden tak, aby základová deska již nyní obsahovala většinu obvodů potřebných pro realizaci výsledného kompletního výrobku. Elektrické schéma základové desky a návrh DPS je součástí přílohy.

Navržené obvody byly sestaveny a funkce proudového regulátoru byla ověřena měřeními na skutečné brzdě. Funkci otáčkového regulátoru nebylo možné ověřit na skutečné brzdě, protože technici nevedli toto zařízení do provozuschopného stavu. Funkce regulátoru otáček tedy byla ověřena simulací v prostředí MATLAB – SIMULINK. Oba použité regulátory jsou funkční.



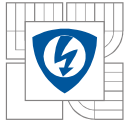
## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VÉVODA, A. *Modernizace brzdového stanoviště pro spalovací motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.
- [2] NOVOTNÝ, J. a kol. *Traktory a automobily I*. druhé doplnené vydanie. Bratislava: Príroda, 1973.
- [3] BERNARD, I. *Automechanik: Technologie pro 1., 2. a 3. ročník OU a UŠ*. Praha: SNTL, 1971.
- [4] BOHACZ, R. On the pump!: Detroit discovers dynamometer testing. *Hemmings: Classic Car* [online]. 2008, February [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: [http://www.hemmings.com/hcc/stories/2008/02/01/hmn\\_feature19.html](http://www.hemmings.com/hcc/stories/2008/02/01/hmn_feature19.html)
- [5] NOVÁK, J. Dynamometr na vířivé proudy a jeho regulace. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2002, č. 06 [cit. 2014-11-17]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/dynamometr-na-virive-proudy-a-jeho-regulace-25051.html>
- [6] Hysteresis Dynamometers (HD Series). *MAGTROL* [online]. [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: [http://www.magtrol.com/motortest/hd\\_dynamometers.html](http://www.magtrol.com/motortest/hd_dynamometers.html)
- [7] Hysteresis Dynamometer Specifications. *MAGTROL* [online]. [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: [http://www.magtrol.com/motortest/hd\\_specifications.html](http://www.magtrol.com/motortest/hd_specifications.html)
- [8] Magtrol Tandem Dynamometer Setups Provide Broad Torque and Speed Range Capabilities. *Industry News* [online]. 2003, June 26 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://news.thomasnet.com/fullstory/tandem-dynamometers-provide-varied-torque-speed-capabilities-24157>
- [9] MEZ BRNO, n.p. *Dynamometr na vířivé proudy typ 2VD 110/6: technický návod*. Brno, 1963.
- [10] INTERNATIONAL RECTIFIER. *High and Low Side Driver IR2110: Product Summary* [PDF]. 2005 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>
- [11] INTERNATIONAL RECTIFIER. *Application Note AN-978: HV Floating MOS-Gate Driver ICs* [PDF]. 2007 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf>
- [12] PATOČKA M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 2, skriptum FEKT, VUT Brno*, 2005.
- [13] PATOČKA M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 1, skriptum FEKT, VUT Brno*, 2005.
- [14] STMICROELECTRONICS. *IRFP460* [PDF]. 1998 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/213/095/irfp460-datasheet-1.pdf>
- [15] ON SEMICONDUCTOR. *MUR1510, MUR1515, MUR1520, MUR1540, MUR1560, MURF1560: SWITCHMODE Power Rectifiers* [PDF]. 2008 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/223/117/mur1560-datasheet-2.pdf>
- [16] SKALICKÝ, J. *Teorie řízení, skriptum FEKT, VUT Brno*, 2002.



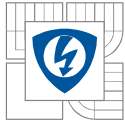
- 
- [17] LEM. *Current Transducer HO-NP/SP33 series* [PDF]. 2014 [cit. 1014-12-12]. Dostupné z: [http://www.lem.com/docs/products/ho-np\\_sp33-1000\\_series.pdf](http://www.lem.com/docs/products/ho-np_sp33-1000_series.pdf)
- [18] BEAUREGARD, Brett. *Arduino PID Library*. *Arduino Playground* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>



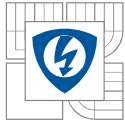


## PŘEHLED SYMBOLŮ A ZNAČEK

$A_0$	aktuální hodnota časovače pro měření otáček	[-]
$A_1$	hodnota časovače pro měření otáček při předcházejícím výpočtu	[-]
ADC	analogově digitální převodník (analog-to-digital converter)	
$B_0$	aktuální hodnota čítače pulzů z inkrementálního čidla	[-]
$B_1$	hodnota čítače pulzů z inkrementálního čidla při předcházejícím výpočtu	[-]
DC	stejnoseměrný proud (direct current)	
DPS	deska plošných spojů	
$F$	síla působící na rameni statoru	[N]
$f$	nosná frekvence PWM tranzistorového měniče	[kHz]
$F_{afi}$	přenosová funkce analogového (RC) filtru signálu z čidla proudu	
$F_{ci}$	přenosová funkce čidla proudu	
$F_{c\omega}$	přenosová funkce čidla otáček	
$F_{dfi}$	přenosová funkce digitálního (FIR) filtru změřené hodnoty proudu	
$F_{im}$	koeficient převodu budícího proudu na brzdny moment	
FIR	filtr s konečnou impulzní odezvou (finite impulse response)	
$F_m$	zjednodušená přenosová funkce tranzistorového měniče	
$f_{měř}$	frekvence změřená čidlem otáček	[Hz]
$F_{m\omega}$	přenosová funkce respektující závislost otáček soustrojí na působícím momentu	
$f_{nast}$	frekvence nastavená na generátoru	[Hz]
$F_{OM}$	standartní tvar přenosu otevřené smyčky pro metodu OM	
$F_S$	přenosová funkce regulované soustavy	
$F_{SO}$	standartní tvar přenosu otevřené smyčky pro metodu SO	
$f_{tim}$	frekvence vnitřního signálu pro časovač	[MHz]
$F_{ui}$	přenosová funkce vinutí brzdy	
$F_{wi}$	zjednodušená přenosová funkce proudové smyčky	
$F_{\omega m}$	koeficient převodu úhlové rychlosti brzdy na brzdny moment	
$g$	tíhové zrychlení ( $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	[m.s <sup>-2</sup> ]
$I_{1VD}$	jmenovitý proud budící cívkou použité brzdy	[A]
$I_{2VD}$	jmenovitý proud budících cívek původního dvojitého dynamometru	[A]
$I_b$	budící proud brzdy	[A]
$i_b$	okamžitá hodnota proudu vinutím brzdy	[A]
$i_{b,z}$	žádaná hodnota proudu (vstupující do bloku proudové smyčky)	[A]
$I_{br}$	proud vybíjecím odporem měniče	[A]
$I_{D,ef}$	efektivní hodnota proudu tranzistorem	[A]
$I_{D,max}$	maximální dovolený trvalý proud tranzistorem	[A]
$I_{D,s}$	střední hodnota proudu tranzistorem	[A]
$I_{D,šp}$	špičková hodnota proudu tranzistorem	[A]
$I_{D,šp,max}$	maximální dovolený špičkový proud tranzistorem	[A]
$I_{F,ef}$	efektivní hodnota proudu diodou	[A]
$I_{F,max}$	maximální dovolený trvalý proud diodou	[A]
$I_{F,s}$	střední hodnota proudu diodou	[A]
$I_{F,šp}$	špičková hodnota proudu diodou	[A]
$I_{F,šp,max}$	maximální dovolený špičkový proud diodou	[A]
$I_I$	integrační konstanta regulátoru proudu	[-]
$I_n$	proud stejnosměrného napájecího zdroje	[A]
$J_{1VD}$	moment setrvačnosti použité brzdy	[kg.m <sup>2</sup> ]
$J_{2VD}$	moment setrvačnosti původního dvojitého dynamometru	[kg.m <sup>2</sup> ]

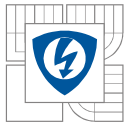


$J_m$	předpokládaný moment setrvačnosti měřeného spalovacího motoru	[kg.m <sup>2</sup> ]
$k_{bezp}$	bezpečnostní koeficient	[-]
$K_{\check{c}i}$	zesílení čidla proudu	[-]
$K_{\check{c}\omega}$	zesílení čidla otáček	[rad <sup>-1</sup> ]
$K_m$	zesílení tranzistorového měniče	[-]
$K_{wi}$	zesílení proudové smyčky	[-]
$l$	délka ramena statoru	[m]
$L_b$	indukčnost budícího vinutí použité brzdy	[H]
$M_{1VD}$	maximální trvalý moment použité brzdy pro dané otáčky	[N.m]
$M_{1VD,max}$	maximální hodnota trvalého momentu použité brzdy v celém rozsahu otáček (při $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ )	[N.m]
$M_{1VD,norm}$	normovaná velikost maximálního trvalého momentu použité brzdy	[-]
$M_{2VD}$	maximální trvalý moment původního dvojitého dynamometru pro dané otáčky	[kg.m]
$M_b$	brzdny moment brzdy	[N.m]
$M_m$	moment měřeného spalovacího motoru pro dané otáčky	[N.m]
$n$	otáčky stroje	[min <sup>-1</sup> ]
$n_{nast}$	žádaná hodnota otáček nastavená uživatelem	[min <sup>-1</sup> ]
$n_{\check{z}}$	žádaná hodnota otáček (pro regulátor)	[min <sup>-1</sup> ]
OM	optimální modul	
$P_{1VD}$	maximální trvalý brzdny výkon použité brzdy pro dané otáčky	[kW]
$P_{2VD}$	maximální trvalý brzdny výkon původního dvojitého dynamometru pro dané otáčky	[kW]
$P_{D,ztr}$	celkový ztrátový výkon na diodě	[W]
$P_I$	proporcionální konstanta regulátoru proudu	[-]
$P_{Q,ztr}$	celkový ztrátový výkon na tranzistoru	[W]
$P_{Q,ztr,on}$	ztrátový výkon na tranzistoru vzniklý vedením proudu	[W]
$P_{Q,ztr,sw}$	ztrátový výkon na tranzistoru vzniklý přepínáním	[W]
PWM	pulsně šířková modulace (pulse width modulation)	
$R_b$	odpor budícího vinutí použité brzdy	[Ω]
$R_{br}$	odpor ve vybíjecím obvodu	[Ω]
$R_{D,d}$	dynamický odpor diody v pracovním bodě (při otevření)	[mΩ]
$R_{D,\theta,JC}$	tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem diody	[°C.W <sup>-1</sup> ]
$R_{DS,on}$	odpor kanálu tranzistoru při plném otevření	[Ω]
$R_I$	přenosová funkce regulátoru proudu	
$R_{Q,\theta,JC}$	tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem tranzistoru	[°C.W <sup>-1</sup> ]
$R_{\theta,h}$	tepelný odpor chladiče (soustavy chladič – okolí)	[°C.W <sup>-1</sup> ]
$R_{\theta,ch}$	tepelný odpor mezi pouzdem a chladičem (podložka + teplovodivá pasta)	[°C.W <sup>-1</sup> ]
$R_\omega$	přenosová funkce regulátoru rychlosti	
$s_D$	střída nulové diody	[-]
SO	symetrické optimum	
$s_Q$	střída tranzistoru	[-]
$t$	čas	[s]
$t_f$	doba poklesu proudu při vypínání tranzistoru	[ns]
$t_r$	doba náběhu proudu při zapínání tranzistoru	[ns]
$U_{1VD}$	jmenovité napětí budící cívky použité brzdy	[V]
$U_{2VD}$	jmenovité napětí budících cívek původního dvojitého dynamometru	[V]
$U_b$	napětí na vinutí budící cívky brzdy	[V]
$u_b$	okamžitá hodnota napětí na vinutí brzdy	[V]
$u_{b,\check{z}}$	žádaná hodnota napětí na budícím vinutí	[V]



---

$u_{bx}$	okamžitá hodnota napětí na bočniku $R_{bx}$ při měření elektromagnetické časové konstanty vinutí brzdy	[V]
$U_{DC,th}$	hodnota, při které se sepne vybijecí větev měniče	[V]
$U_{DS,max}$	maximální dovolené závěrné napětí tranzistoru	[V]
$U_F$	napětí na diodě v propustném směru	[V]
$U_n$	napětí stejnosměrného napájecího zdroje	[V]
$U_R$	maximální dovolené závěrné napětí diody	[V]
$\delta$	relativní chyba měření	[%]
$\Delta I_b$	zvlnění proudu budícím vinutím brzdy	[A]
$\Delta I_{b,max}$	maximální zvlnění proudu budícím vinutím brzdy	[ $\mu$ A]
$\vartheta_{D,j}$	teplota přechodu diody	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_{D,j,max}$	maximální dovolená teplota přechodu diody	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_{D,jh}$	rozdíl teplot mezi přechodem diody a chladičem	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_h$	teplota chladiče	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_o$	teplota okolí	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_{Q,j}$	teplota přechodu tranzistoru	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_{Q,j,max}$	maximální dovolená teplota přechodu tranzistoru	[ $^{\circ}$ C]
$\vartheta_{Q,jh}$	rozdíl teplot mezi přechodem tranzistoru a chladičem	[ $^{\circ}$ C]
$\tau_{afi}$	časová konstanta analogového (RC) filtru signálu z čidla proudu	[ $\mu$ s]
$\tau_{ci}$	časová konstanta čidla proudu	[ $\mu$ s]
$\tau_{c\omega}$	časová konstanta čidla otáček	[ms]
$\tau_{dfi}$	časová konstanta digitálního (FIR) filtru změřené hodnoty proudu	[ $\mu$ s]
$\tau_l$	elektromagnetická časová konstanta brzdy (hodnota použitá pro výpočty a simulaci)	[ms]
$\tau_{l,off}$	elektromagnetická časová konstanta brzdy změřená při vypnutí proudu	[ms]
$\tau_{l,on}$	elektromagnetická časová konstanta brzdy změřená při zapnutí proudu	[s]
$\tau_m$	náhradní časová konstanta tranzistorového měniče	[ $\mu$ s]
$\tau_{wi}$	náhradní časová konstanta proudové smyčky	[ms]
$\tau_{\sigma}$	malá nebo součtová časová konstanta regulované soustavy	[s]
$\omega$	úhlová rychlost soustrojí	[rad.s <sup>-1</sup> ]

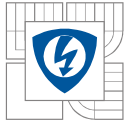


---

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**A CHARAKTERISTIKY POUŽITÉ VÍŘIVÉ BRZDY**

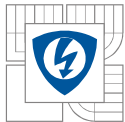
**B KOMPLETNÍ MODEL PRO SIMULACI OTÁČKOVÉ SMYČKY**



## A. CHARAKTERISTIKY POUŽITÉ VÍŘIVÉ BRZDY

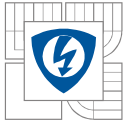
Tab. A-1: Závislost maximálního brzdného momentu na otáčkách (oblast omezení proudem) [9]

$n$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_{2VD}$ (kg.m)	$M_{IVD}$ (N.m)	$\omega$ ( $\text{rad.s}^{-1}$ )	$M_{norm,IVD}$ (N.m)
0	0	0,00	0,0	0,000
125	20	98,10	13,1	0,231
250	34	166,77	26,2	0,393
375	44	215,82	39,3	0,509
500	52,6	258,00	52,4	0,608
625	59,5	291,85	65,4	0,688
750	64,8	317,84	78,5	0,749
875	69	338,45	91,6	0,798
1000	72,8	357,08	104,7	0,842
1125	75,5	370,33	117,8	0,873
1250	77,7	381,12	130,9	0,898
1375	79,7	390,93	144,0	0,921
1500	81	397,31	157,1	0,936
1625	82,5	404,66	170,2	0,954
1750	83,5	409,57	183,3	0,965
1875	84,5	414,47	196,3	0,977
2000	85,1	417,42	209,4	0,984
2125	85,7	420,36	222,5	0,991
2250	86	421,83	235,6	0,994
2375	86,3	423,30	248,7	0,998
2500	86,5	424,28	261,8	1,000



Tab. A-2: Závislost maximálního brzdného momentu na otáčkách (oblast omezení maximálním brzdným výkonem) [9]

$n$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$M_{2VD}$ (kg.m)	$M_{1VD}$ (N.m)
2500	86,5	424,28
2625	82	402,21
2750	78	382,59
2875	74,5	365,42
3000	71,5	350,71
3125	68,5	335,99
3250	66	323,73
3375	63,5	311,47
3500	61	299,21
3625	59	289,40
3750	57	279,59
3875	55,5	272,23
4000	54	264,87
4125	52	255,06
4250	51	250,16
4375	49	240,35
4500	48	235,44
4625	46,5	228,08
4750	45,5	223,18
4875	44	215,82
5000	43	210,92
5125	42	206,01
5250	41	201,11
5375	40	196,20
5500	39	191,30
5625	38	186,39
5750	37,5	183,94
5875	36,5	179,03
6000	36	176,58



## B. KOMPLETNÍ MODEL PRO SIMULACI OTÁČKOVÉ SMYČKY

